WILLIAM R. SHEA

La revolución intelectual de Galileo

Ariel
methodos

WILLIAM R. SHEA

LA REVOLUCIÓN INTELECTUAL DE GALILEO

EDITORIAL ARIEL, S. A.
BARCELONA

Título original:
Galileo's Intellectual Revolution
(The Macmillan Press)

1.ª edición: noviembre 1983

Traducción de
CARLOS PERALTA

©1972: William R. Shea

Derechos exclusivos de edición en castellano
reservados para todo el mundo
y propiedad de la traducción:
©1983: Editorial Ariel, S. A.
Córcega, 270 - Barcelona-8

ISBN: 84 344 8009 3

Depósito legal: B. 35.005 - 1983

Impreso en España

ÍNDICE

Prefacio 11

1. El discípulo de Arquímedes 17
2. La hidrostática y el uso regulador de los experimentos . . 30
3. Las manchas solares y los cielos inconstantes 67
4. El desafío de los cometas 95
5. El fin del cosmos aristotélico: la Primera Jornada del *Diálogo* 132
6. El mundo en movimiento: la Segunda y Tercera Jornadas del *Diálogo* 155
7. La prueba física de las mareas: la Cuarta Jornada del *Diálogo* 199

Bibliografía selecta 217

Índice alfabético 225

PREFACIO

Hasta época bastante reciente, los historiadores de la ciencia enfocaban su atención en alguna ley importante de la ciencia contemporánea y procedían luego a rastrear su origen en la maraña filosófica de la revolución científica del siglo XVII. Este método soslayaba cómodamente el derrumbe de teorías antaño útiles y difundidas, y olvidaba los largos viajes intelectuales por caminos equivocados. Los historiadores sabían qué estaban buscando y, cuidadosamente, limitaban su investigación a las regiones donde estaban seguros de encontrar su presa. Se leía la historia de la ciencia como un relato de éxitos; y no se perturbaba la celebridad de Galileo y de otros grandes hombres con ninguna referencia a sus aventuras menos logradas.

Este enfoque, que merece el nombre de visión lineal de la historia de la ciencia, contrasta con el método contextual, que procura una mejor comprensión del verdadero proceso del pensamiento de los antiguos hombres de ciencia. Según este segundo punto de vista, la historia de la ciencia no debe solamente explicar las teorías actuales a la luz del desarrollo anterior, sino también evaluar las teorías antiguas en los términos del marco conceptual de los científicos que las crearon, y juzgarlas según el trasfondo de la imagen del mundo o cosmovisión de su época. Esto puede conducir al historiador al callejón sin salida del pasado, pero también allanará el camino para una interpretación menos anacrónica del surgimiento de la ciencia moderna y del proceso real del descubrimiento científico.

Esta diferencia de enfoque es particularmente evidente en el caso de Galileo. El historiador lineal de la ciencia pregunta: «¿Por qué pretende la fama Galileo?» y el historiador contextual: «¿Por qué *pretendía* la fama Galileo?» o también, para enmarcar la pregunta con alguna mayor precisión: «¿Cuál creía Galileo que era su pretensión? ¿Sobre qué base estaba dispuesto a afirmar su reputación? ¿Cuál fue –a su juicio– su hallazgo más grande y perdurable?» La respuesta a la primera clase de pregunta es bien conocida: por su descubrimiento de la ley que gobierna la velocidad de los cuerpos que caen libremente al suelo. Las respuestas a la segunda clase de preguntas son menos familiares. Su revelación suele causar embarazo, porque Galileo se enorgullecía de su argumento más deplorable a favor de la teoría heliocéntrica: su explicación de las mareas como un resultado del movimiento de la tierra. Es el secreto de fa-

milia de la revolución científica, pero nos puede enseñar aspectos esenciales acerca de la anatomía de la ciencia galileana como espero aclarar extensamente en el último capítulo de este libro.

Se pueden distinguir tres períodos en la carrera de Galileo: un período inicial (1564-1610), un período intermedio (1610-1632) y uno final (1632-1642). El primer período de la vida de Galileo, como estudiante y luego profesor en Pisa y Padua, está bien documentado en la obra de Antonio Favaro *Galileo Galilei e lo Studio di Padova*. El último período, centrado en los *Discursos y demostraciones matemáticas acerca de dos nuevas ciencias*, es el tema de varios estudios importantes y, hace poco, de una excelente edición anotada por L. Geymonat y A. Carugo. El período intermedio, entre 1610, cuando Galileo retorna a Florencia, y 1632, fecha de publicación del *Diálogo acerca de los dos sistemas máximos del mundo* –creador de una nueva época– ha recibido relativamente poca atención, en gran medida a causa de la falta de interés de los historiadores lineales por las ideas, los descubrimientos y los modos de aprehensión que no se orientan hacia los principales desarrollos modernos. Fue durante ese período que Galileo elaboró la metodología de su revolución intelectual, y por esta razón he decidido investigarlo. Los asuntos que más preocupaban a Galileo en ese momento eran los problemas de hidrostática, los recientes descubrimientos astronómicos y la convalidación definitiva de la teoría heliocéntrica. El conflicto con la Iglesia y el célebre juicio son meramente incidentales.

El análisis detallado de la influencia que ejercieron sobre Galileo sus precursores medievales y renacentistas, por una parte, y por la otra el del desarrollo de las ideas de Galileo sobre mecánica y dinámica en el período paduano y su florecimiento en los *Discursos* de 1638, nos habrían llevado demasiado lejos. He debido contentarme con breves referencias a estos temas que exigirían por sí solos un libro.

El primer capítulo es introductorio y esboza el desarrollo del método galileano desde sus días de estudiante en Pisa hasta el final de su estada en Padua. La ortodoxia contra la que Galileo se rebelaba era la filosofía natural heredada del pensamiento clásico, medieval y renacentista. En términos muy generales, éste consideraba que la naturaleza era un proceso, lo que apartaba las especulaciones de los problemas de estructura y mecanismo y las dirigía hacia los problemas de función y desarrollo. Su principal preocupación era el hombre, y la naturaleza en relación con el hombre; y no la naturaleza como una existencia objetiva e independiente de la que el hombre era sólo una parte. Se empleaban las leyes físicas como ejemplos incidentales de los conceptos metafísicos generales. Era más importante comprender cómo la forma era inherente a la materia o cómo el alma se relacionaba con el cuerpo que establecer teorías precisas acerca del vuelo de los proyectiles o de la acción de las máquinas simples. Como las explicaciones metafísicas son más bien com-

prehensivas que especializadas o detalladas, florecían entonces las analogías orgánicas y antropomórficas. Esta preocupación teleológica se unía a un crudo empirismo sustentado sobre la suposición de que era posible edificar directamente la filosofía natural sobre la percepción. Se negaba la posibilidad de la física matemática sobre la base de que las abstracciones matemáticas no podían reemplazar los hechos coloridos y cualitativamente determinados de la experiencia común; no se podía deducir el movimiento de meras consideraciones geométricas.

Como profesor de matemáticas, Galileo estaba relativamente libre de las presiones académicas y del peso de la tradición institucional que había determinado la dirección de la especulación filosófica durante siglos. Galileo conocía el punto de vista de Arquímedes sobre el universo y en esta perspectiva estaban latentes –si bien todavía no explícitos– los principios que habían de desafiar y derribar los supuestos básicos de la filosofía oficial.

El capítulo 2 investiga la historia del debate sobre los cuerpos flotantes en que Galileo intervino, a su regreso a Florencia, en 1610. Intentó ampliar deductivamente los principios de Arquímedes, pero pronto descubrió que había inferido conclusiones correctas de premisas erróneas. Esto acrecentó su consciencia del uso regulador de los experimentos, pero no abandonó por eso su modelo de la ciencia como un proceso deductivo. Al par del redescubrimiento de Arquímedes se produjo un renacimiento del interés por Demócrito y el atomismo, y la aparición gradual de una convicción: la materia inanimada sólo poseía, esencialmente, cualidades geométricas y mecánicas sencillas. Esta visión de la naturaleza en los términos de variables matemáticas sencillas decretaría el destierro de las analogías orgánicas, porque éstas eran más complejas que las situaciones inorgánicas que pretendían explicar.

Los capítulos 3 y 4 estudian las dos prolongadas controversias sobre las manchas solares, en 1612, y sobre los cometas, en 1618. Galileo estaba convencido de que ocurrían cambios en todo el reino de la naturaleza, y anhelaba encontrar apoyo para sus creencias. Por otra parte, sus adversarios eran escépticos acerca de la posibilidad del cambio en los cuerpos celestes, y no deseaban interpretar las pruebas de un modo que favoreciera esa suposición. Por consiguiente, cuando se observaron manchas negras en la superficie del sol, Galileo estimó que eran nubes, mientras sus adversarios sugerían que se trataba meramente de estrellas no observadas hasta ese momento. El debate sobre los cometas ilustra bien a la vez cómo las suposiciones básicas de un científico determinan los límites generales dentro de los cuales está dispuesto a teorizar, y el tipo de preguntas a las que desea responder. Galileo temía que la indisciplinada trayectoria de los cometas significara una grave amenaza para el sistema heliocéntrico si eran cuerpos físicos reales. Por lo tanto, era tentador suponer que no lo eran. Esto es precisamente lo que hizo cuando

postuló que eran refracciones de la luz solar en la atmósfera. Su explicación se desmoronó, pero Galileo no vaciló en su convicción de que la tierra se movía y de que los acontecimientos terminarían por justificarlo en última instancia.

El capítulo 5 informa sobre la situación de los estudios cosmológicos antes de Galileo, y analiza sus disquisiciones sobre el cosmos doble de Aristóteles en la Primera Jornada del *Diálogo acerca de los dos sistemas máximos del mundo.* Los obstáculos que Galileo debía superar no eran sólo filosóficos, sino también sociológicos y psicológicos. La principal dificultad intelectual se refería al concepto de movimiento y a sus divisiones en movimiento natural y forzado, circular y rectilíneo. La dificultad sociológica procedía en parte de la prohibición eclesiástica del sistema copernicano, y en parte de la adhesión de los jóvenes e insolentes *letterati* a la teoría heliocéntrica simplemente porque atacaba la doctrina oficial de las universidades. Finalmente, había un bloqueo psicológico determinado por la representación visual del universo geocéntrico que los hombres estaban educados para emplear como el entorno imaginativo de sus especulaciones cosmológicas. Galileo observó que los astrónomos tendían inconscientemente a mantener la imagen mental del sistema con el que estaban familiarizados incluso si deseaban aceptar la reevaluación radical de sus características espaciales y temporales.

El capítulo 6 examina los argumentos acerca del movimiento diurno y el anual de la tierra, propuestos en la Segunda y Tercera Jornadas del *Diálogo.* La demostración de Galileo parte de un llamamiento a la elegancia y la sencillez matemáticas. Este enfoque estético soslayaba convenientemente los problemas prácticos de dinámica y permitía que Galileo evitara el estudio de las fuerzas que actúan sobre los cuerpos. En verdad, nunca se preocupó por las detalladas complejidades de la teoría planetaria, ni afrontó seriamente la pregunta ¿por qué los cuerpos celestes se mueven en las órbitas en que se mueven? Sin embargo, exigía realismo. Deseaba que la astronomía fuera una ciencia de representación y no de cálculo, una ciencia que se ocupara de cuerpos físicos reales y no de meras magnitudes matemáticas. Que se debieran elegir hipótesis sencillas no era tan sólo por el uso pragmático del principio de economía: era la naturaleza misma la que no hacía con muchos actos lo que se podía hacer con pocos.

El capítulo 7 analiza a esta luz la demostración física de Galileo del movimiento de la tierra a partir del fenómeno de las mareas. Es aquí, tal vez, que encontramos el mejor ejemplo de su método científico. Galileo estaba seguro de que había explicado las mareas porque había deducido su periodicidad de postulados físicos geometrizados.

Se verá que algunos temas recurren en diversos capítulos. Se trata principalmente de la interrelación de las matemáticas y los experimentos, y de la difundida influencia que ejercen los esquemas conceptuales

sobre la interpretación de la naturaleza. En un tiempo se tomaba literalmente a Galileo y se suponía que llevaba una vida de constante experimentación. Ahora se reconoce en general, sobre todo después de los estudios de Alexandre Koyré, que Galileo ejecutaba la mayor parte de sus experimentos en su mente y en el papel. Hace poco el profesor Thomas B. Settle ha demostrado que algunas descripciones de experimentos de Galileo son exactas, y el profesor Stillman Drake, en una serie de convincentes ensayos, ha sostenido que Galileo era en cierta medida un empirista y tal vez, incluso, un positivista. Debo mucho a la sabiduría de estos dos eruditos, pero estimo que mis propias conclusiones confirman la corrección del análisis de Koyré. Pocos o ninguno, entre los experimentos del siglo XVII, admitían exclusivamente una interpretación, en especial cuando su realización era significativa. Tenían diversos significados según los distintos contextos teóricos. He tratado de dejar hablar a Galileo por sí mismo, citando extensamente sus obras; las traducciones son de mi propiedad, o versiones revisadas de las existentes.*

En el curso de esta investigación he contraído muchas deudas. En primer lugar, desearía agradecer a Mr. Gerd Buchdahl, a la Dra. M. B. Hesse y el Dr. M. A. Hoskins, quienes, amablemente, han leído el manuscrito y que, por sus variados conocimientos, sus comentarios alentadores y sus prudentes críticas me han permitido sentir que no me he equivocado por completo. También deseo reconocer mi profunda deuda con el profesor Allen G. Debus por su amistosa guía y por los efectos estimulantes de sus agudos comentarios a diversos aspectos de mi tarea. He recibido también particular ayuda, especialmente en forma de conversación, del Master y los Fellows del Darwin College, Cambridge, donde se escribió este libro; de los profesores I. B. Cohen, A. C. Crombie, Stillman Drake, Carlo Maccagni, L. M. Righini-Bonelli, Paolo Rossi, C. B. Schmitt, T. B. Settle y D. T. Whiteside. En algunos casos han discutido en vano conmigo, y sólo yo soy responsable por los resultados; pero merecen el crédito por toda buena idea que de ellos haya tomado para emplear aquí.

Debo especial agradecimiento a Mr. John Oates, bibliotecario del Darwin College; a Mrs. Rita van der Straeten, bibliotecaria del Whipple Science Museum; a Mr. Maurice Alarie, bibliotecario de la Vanier Library, Ottawa; y a los funcionarios del Archivio di Stato, Venecia; la Biblioteca Nazionale, Florencia; la Biblioteca Nazionale, Roma; el British Museum; la Cambridge University Library; la Domus Galileana de

* En esta edición, y con el acuerdo del Profesor William Shea, se han traducido las abundantes citas directamente de los originales de Galileo, cotejando desde luego los textos con la traducción del autor. La fuente de ambas versiones –la de WBS y la nuestra– ha sido la misma: la edición de *Le Opere* de Galileo Galilei a cargo de Antonio Favaro, ed. G. Barbèra, Florencia, 1899-1909, reimpresa en 1929-1939. *(N. del t.)*

Pisa; el Istituto e Museo di Storia della Scienza de Florencia, y la Widener Library de la Harvard University.

Agradezco al Canada Council las ayudas que me han permitido trabajar durante tres veranos en bibliotecas europeas, y al decano Gilles Cazabon y a Mrs. Jeanne Laviolette de la Faculty of Philosophy de la University of Ottawa por su inapreciable colaboración. También a Mrs. Verna Cole y a Mrs. Estelle Diagle por su habilidad para descifrar y para dactilografiar.

Finalmente deseo expresar de todo corazón mi gratitud a mi esposa Evelyn, por su constante aliento, su consejo erudito y su incomparable paciencia.

Parte del material de este libro ha sido publicado ya, en otras formas en *Ambix, British Journal for the History os Science, Isis, Physis, Revue de l'Université d'Ottawa. Saggi su Galileo Galilei* y *Studi Secenteschi.*

WILLIAM R. SHEA

Faculty of Philosophy
University of Ottawa
Junio de 1971

1

EL DISCÍPULO DE ARQUÍMEDES

El período prepaduano

Galileo nació en Pisa el 15 de febrero de 1564 y en 1581 ingresó en la Universidad de su ciudad natal, donde se matriculó como estudiante en la facultad de humanidades. Durante las vacaciones de verano de 1584 conoció a Ostilio Ricci, antiguo alumno de Niccolò Tartaglia, y exponente de las «nuevas» matemáticas de la *Accademia del Disegno* florentina. Galileo, atraído inmediatamente por el tema, se entregó al estudio de la geometría. Desarrolló varios teoremas sobre el centro de gravedad de los sólidos y, en gran medida por la importancia de este trabajo, fue designado catedrático de matemáticas, en Pisa, en 1589. Como lo demuestran sus primeros escritos, el interés de Galileo por las matemáticas fue duradero, y pronto emprendió el estudio de las obras de Arquímedes. El primero de sus trabajos que se conserva, escrito en italiano –*La Bilancetta*–, data de 1586: se inspira en la esperanza de encontrar el método utilizado por Arquímedes para resolver el problema de la corona hecha para el rey Herón por un herrero de rara habilidad, pero dudosa honestidad; el rey sospechaba que había utilizado una aleación en lugar de oro puro. Galileo se enorgullecía de que la balanza hidrostática que había inventado era realmente la misma que había creado Arquímedes. Como los matemáticos contemporáneos, creía que no había mayor logro que seguir los pasos del gran siracusano. «Quienes leen sus trabajos –escribió con admiración juvenil– demasiado comprenden cuán inferiores son todas las demás mentes comparadas con la de Arquímedes, y qué pequeña esperanza queda de descubrir alguna vez cosas similares a las que él descubrió.»[1]

Siguiendo la tradición florentina, Galileo produjo también trabajos literarios. Éstos incluyen *Dos Conferencias ante la Academia Florentina sobre la forma, lugar y tamaño del Infierno de Dante. Consideraciones sobre Tasso, Apostillas a Ariosto*, y un poema satírico titulado *Con-*

1. Galileo, *La Bilancetta (La balancita)*, en *Le Opere di Galileo Galilei*, editado por A. Favaro, 20 volúmenes (ed., G. Barbèra, Florencia, 1890-1909). Vol. I, pp. 215-216.

tra el uso de la toga. En el primero de estos trabajos, Galileo intentó determinar ciertas características físicas del *Infierno* de Dante, pero su enfoque era matemático y no se fundaba en la experiencia o la observación.

> Es una cosa admirable y difícil... que los hombres hayan logrado, mediante largas observaciones, vigilias continuas y navegaciones peligrosas, medir y determinar los intervalos de los cielos, las razones de sus movimientos rápidos y lentos, el tamaño de las estrellas cercanas y distantes, y el lugar de la tierra y el mar, cosas que, completamente o en su mayor parte, *se rinden ante los sentidos.* Cuánto más maravilloso deberíamos considerar el estudio y la descripción del lugar y del tamaño del infierno que yace en las entrañas de la tierra, *oculto a todos los sentidos, y que nadie conoce por experiencia.*[2]

Nuevamente aquí acude a Arquímedes en procura de guía e inspiración: «Calcularemos según las cosas demostradas por Arquímedes en sus libros *Sobre la esfera* y *Sobre el cilindro.*»[3] En un ensayo iluminador, Charles B. Schmitt comenta: «Podríamos esperar que el análisis incluyera algunos elementos de la tecnología y la artesanía retratadas tan vívida y gráficamente por el mismo Dante en la descripción del *Infierno;* pero están totalmente ausentes. El enfoque general de este problema es matemático y se podría observar que no sólo el "libro de la naturaleza" está escrito en términos matemáticos, sino también, al menos en este caso, el "libro de lo sobrenatural".»[4]

Aunque Arquímedes no era completamente desconocido en la Edad Media, sus trabajos no recibieron atención seria y erudita hasta el siglo XVI.[5] Su redescubrimiento abrió una nueva y fresca visión del mundo, y

2. *Opere di Galileo,* Vol. IX, p. 31, bastardillas del autor.

3. *Ibid.,* p. 34.

4. C. B. Schmitt, «Experience and Experiment: A Comparison of Zabarella's View with Galileo's in *De Motu*», *Studies in the Renaissance,* n.º 16 (1969), pp. 130-131, n.-119. He invertido el orden de las oraciones.

5. Luca Gaurico, matemático napolitano, publicó los textos en latín de *La medida del círculo* y de *La cuadratura de la parábola* en Venecia, en 1503, utilizando la traducción de Moerbeke del siglo XIII. En 1543, Tartaglia publicó una copia literal de la edición de 1503, y añadió *Sobre el equilibrio de los planos* y el Libro I de *Sobre los cuerpos flotantes.* El año siguiente, Thomas Gechauff Venatorius publicó la *editio princeps* en Basilea. En 1558, Federico Commandino publicó en Venecia las traducciones latinas de *La medida del círculo, De las líneas espirales, La cuadratura de la parábola, De los conoides y los esferoides* y *El calculador de arena.* Su traducción de *Sobre los cuerpos flotantes (Archimedis de iis quae vehuntur in aqua)* apareció siete años más tarde, en 1565. El mismo año, de la herencia de Tartaglia, el impresor veneciano Curtius Troianus publicó el texto completo de *Sobre los cuerpos flotantes (Archimedis de insidentibus).* Francesco Maurolico publicó también una traducción completa de Arquímedes en Sicilia, en 1570, pero se perdió casi completamente en un naufragio. Ver E. J. Dijksterhuis, *Archimedes* (ed. Ejnar Munksgaard, Copenhague, 1956), pp. 40-41; Marshall Clagett, *Archimedes in the Middles Ages,* n.º 1, *The Arabo-Latin Tradition* (ed. University of Wisconsin Press, Madison, 1964), pp. 13-14.

sus trabajos ejercieron la fascinación de la novedad sobre ese joven sometido al aburrimiento de la desgastada energía del aristotelismo. Todas las cartas que se conservan de Galileo y que no se ocupan de asuntos personales están dirigidas a los matemáticos Christopher Clavius, Guidobaldo del Monte y Michel Coignet. A éstas podemos añadir una carta anónima que elogia uno de sus teoremas geométricos; y una defensa de la originalidad de sus *Theoremata circa centrum gravitatis solidorum*, por Giuseppe Moletti, el profesor de matemáticas de Padua y por otras personalidades notables.

Durante este período, Galileo no parece haberse interesado en problemas de tecnología. La primera prueba documental de su interés directo en ciencia aplicada aparece en su descripción de la balanza hidrostática, en la que observaba dificultades:

> Por ser finísimos esos alambres, como lo requiere la precisión, no es posible contarlos con la vista porque la mirada se extravía entre espacios tan pequeños. Por lo tanto, para contarlos fácilmente, se toma un estilete muy agudo y se desliza despacio, despacio, sobre los alambres. De este modo, en parte por el oído y en parte por el obstáculo que halla la mano en cada vuelta del alambre, contaremos con facilidad el número de vueltas.[6]

No se hallan indicaciones tan prácticas en las dos versiones del método de Arquímedes que han llegado hasta nosotros.[7] Se manifiesta ya un incipiente experimentalismo en la tabla de gravedades específicas que Galileo deduce de la balanza hidrostática. Esto representa su mayor aproximación, durante este período, a lo que llegó a conocerse más tarde como «ciencia experimental».

Recientemente, el profesor Stillman Drake ha llamado la atención acerca de otra posible fuente del interés posterior de Galileo en la verificación experimental de las leyes matemáticas. Entre 1585 –cuando deja la Universidad de Pisa sin graduarse– y 1589 –cuando obtiene la cátedra de matemáticas de Pisa– Galileo vivió principalmente en Florencia, dando clases particulares de matemáticas. Fue precisamente durante estos años que su padre, Vincenzio Galilei, realizó una cantidad de experimentos para refutar la creencia común entre los teóricos musicales de que las pequeñas fracciones numéricas, 2:1, 3:2 y 4:3, se asociaban siempre a tonos agradables. Vincenzio Galilei aceptaba que estos números dieran octavas, quintas y cuartas en cuerdas del mismo material,

6. Galileo, *La bilancetta, Opere di Galileo*, Vol. I, p. 220.

7. Están explicados en T. L. Heath, *The Works of Archimedes* (ed. Dover, Nueva York, 1953), pp. 259-261. Las fuentes del tema son Vitruvius, *De Architectura*, Libro 9, prólogo (en la edición y traducción de F. Granger [ed. Heinemann, Londres, 1962], pp. 202-207), y *Carmen de ponderibus*, ver Marshall Clagett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages* (ed. University of Wisconsin Press, Madison, 1961), pp. 85-90.

igualmente tensas, si sus longitudes estaban en esas proporciones; pero encontró mediante sus experimentos que, si las longitudes eran iguales y las tensiones variaban, los pesos necesarios para producir tensiones que dieran los mismos intervalos eran iguales al cuadrado de los números. Además, hizo experimentos con cuerdas de diferentes materiales y diferentes pesos y descubrió que no se puede obtener con seguridad el unísono entre dos cuerdas si éstas difieren en algún aspecto, cualquiera que sea. No es improbable que su hijo Galileo, que era además un consumado músico, estuviera plenamente informado de su investigación. La evidencia es circunstancial pero aumenta por el hecho de que la música se consideraba todavía en ese momento una rama especial de las matemáticas, y de que Galileo se interesó por el problema de las proporciones. Sin embargo, no tenemos indicios de que haya realizado alguno de los experimentos mencionados por su padre.[8]

La noción popular de que Galileo fue el primer experimentador terco y cabal debe mucho a su primer biógrafo, Vincenzio Viviani. Siguiendo el estilo hagiográfico de moda en su época, Viviani tergiversó seriamente los intereses iniciales de Galileo al sostener que había descubierto el isocronismo del péndulo y la ley de la aceleración uniforme de los cuerpos que caen mediante experimentos realizados mientras era todavía un estudiante en Pisa. Según Viviani, el balanceo regular de una lámpara en la catedral llamó un día la atención de Galileo: «...realizando experimentos muy precisos, comprendió que las oscilaciones eran iguales. Inmediatamente, decidió adaptar este descubrimiento al problema de la medición del pulso, como se exigía en la medicina.»[9] Sin embargo, no existen pruebas de que Galileo inventara alguna vez un pulsílogo, o instrumento para medir el ritmo del pulso. Además, Galileo no menciona el isocronismo del péndulo hasta que, en 1602, lo trata en una carta a Guidobaldo del Monte, quien habría estado informado del descubrimiento con mucha anterioridad si éste proviniese de la época de estudiante de Galileo.

La segunda leyenda que debemos a Viviani es la vívida descripción de Galileo subiendo a la torre inclinada de Pisa en presencia de la Universidad reunida, y demostrando «con experimentos repetidos» que los cuerpos caen a la misma velocidad independientemente de su peso.[10] Es

8. Stillman Drake, *Galileo Studies* (ed. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1970), pp. 43-61.

9. Vincenzio Viviani, *Racconto istorico della vita di Galileo Galilei, Opere di Galileo*, Vol. XIX, p. 603.

10. *Ibid.*, p. 606. En 1612, dos décadas después de que Galileo abandonara Pisa, Giorgio Coresio dejó caer diferentes pesos del mismo material desde la Torre inclinada y halló que el peso más liviano quedaba siempre detrás, demostrando que Aristóteles estaba en lo cierto (Giorgio Coresio, *Operetta intorno al galleggiare de' corpi solidi*, [Florencia, 1612], *ibid.*, n.º 3, p. 242. Vincenzo Renieri realizó el mismo experimento en 1641 con bolas de madera y plomo y alcanzó resultados análogos (carta a Galileo, 13 marzo 1641, *ibid.*, XVIII, p. 305).

cierto que en su *De motu*, escrito alrededor de 1590, Galileo menciona las torres ocho veces en relación a cuatro series diferentes de problemas; pero debemos considerar de qué modo y con qué clase de resultados.

En el primer caso, intenta refutar la teoría de Aristóteles de que las velocidades de los cuerpos que caen libremente son proporcionales a su peso. «Podemos ver experimentalmente *(videmus enim experientia)* que si caen desde una torre dos esferas de igual tamaño, una de las cuales dobla en peso a la otra, la más pesada no llega al suelo el doble de rápido.»[11] Sin embargo, la afirmación de Galileo no es que todos los cuerpos caen a la misma velocidad independientemente de su peso, sino que la velocidad de un cuerpo que cae es proporcional a la diferencia entre su gravedad específica y la densidad del medio en el que cae. En otras palabras, llega a la conclusión errónea de que los cuerpos del mismo material pero diferentes tamaños caen al mismo ritmo, mientras que los cuerpos del mismo tamaño pero diferentes materiales no.

En segundo lugar, afirma que los objetos que caen desde altas torres no descienden a velocidad constante, sino que muestran aceleración. Explica esto suponiendo que las torres existentes no tienen altura suficiente para que los cuerpos que caen alcancen su velocidad uniforme «natural».[12]

En tercer lugar, repitiendo un viejo argumento contra la opinión de Aristóteles de que hay un intervalo de reposo en el cambio de dirección del movimiento, Galileo argumenta que una piedra arrojada hacia arriba «contra otra piedra grande que cae desde una torre» no se detiene antes de comenzar su movimiento descendente.[13]

Finalmente, y con mayor énfasis «experimental», dice que los cuerpos arrojados desde las torres ilustran que los objetos livianos caen más rápido que los más pesados al comenzar su movimiento natural.

> Es cierto que la madera se mueve más rápidamente que el plomo al comenzar su movimiento; pero poco después el movimiento del plomo se acelera tanto que deja atrás a la madera. Y si ambos se arrojan desde una torre alta, el plomo cae mucho más rápido. Esto lo he ensayado con frecuencia.[14]

---

11. Galileo, *De Motu, ibid.*, Vol. I, p. 267, comentario de la línea 10. Ver también *ibid.*, p. 263 y 317. Un caso especial es la observación de Galileo de que si un cuerpo debe caer el doble de rápido que otro, según la ley «correcta» de la caída libre, esto no se verifica, *ibid.*, p. 273.

12. *Ibid.*, p. 329.

13. *Ibid.*, p. 326.

14. *Ibid.*, p. 334. Ver también la p. 269, comentario de la línea 10, y pp. 406-407, C. B. Schmitt cita una sugerencia hecha por Donald A. Miklich para explicar la desconcertante afirmación de Galileo de que la madera se mueve más rápidamente que el plomo al comienzo de su movimiento. «Si se intenta el experimento de tirar simultáneamente una bola de plomo y una de madera –especialmente si se las ha sostenido durante algún tiempo para ali-

De estos cuatro casos, el segundo y el tercero son claramente experimentos mentales. Se puede decir lo mismo del cuarto, cuya conclusión ha sido fácilmente falsificada: a pesar de lo que alega Galileo, una bola de madera no cae más rápido que una bola de plomo durante ninguna cantidad perceptible de tiempo. Queda el primer caso, donde sostiene que se refuta la ley de la caída libre de Aristóteles. Galileo quizás haya intentado refutar a Aristóteles en el terreno experimental, pero la teoría errónea a que llega, mediante la aplicación insatisfactoria de los principios generales de la hidrostática, hace que esto parezca improbable.

Por lo tanto, parecería que los principios metodológicos básicos de Galileo no derivaban de la observación detallada de los fenómenos naturales. Esto no quiere decir que despreciara la tradición de los artesanos, sino simplemente que su orientación inicial era matemática; todo lo que escribió entre 1584 –la fecha de su primer acercamiento a las matemáticas– y 1592 –cuando fue a Padua para embarcarse en una nueva aventura– lo confirma.

La originalidad de la posición de Galileo se comprende mejor sobre el trasfondo de la estructura de la universidad en la última parte del siglo XVI. Su cátedra de matemáticas quizás fuese menos lucrativa que las de sus colegas que enseñaban filosofía, pero sufría menos limitaciones intelectuales. Se esperaba que un catedrático de filosofía explicara el pensamiento de Aristóteles, y el objetivo principal de su misión académica era enseñar sus escritos. La suposición presente en esto era, desde luego, que si se comprendía correctamente y se enseñaba adecuadamente Aristóteles, los estudiantes estarían equipados con las herramientas conceptuales y las categorías básicas necesarias para interpretar el mundo físico. La situación particular de Galileo era diferente. Como maestro de matemáticas, tenía una tarea mucho menos claramente definida que el filósofo, obligado a aceptar la totalidad de los comentarios aristotélicos anteriores. Su tarea era comprender y explicar los trabajos de Euclides y Ptolomeo, los dos autores estudiados en las clases formales; pero no estaba encadenado por varios siglos de tradición filosófica institucional.

Las distintas perspectivas mentales de filósofos y matemáticos implicaban una manera diferente de ver el mundo. Por un lado, los filósofos, siguiendo a Aristóteles, veían el universo como una entidad biológica y viviente, orientada teleológicamente, que se comprendía mejor mediante la experiencia y el razonamiento silogístico. Su sistema era un círculo cerrado; y vivir en ese mundo en que se trataba con meticuloso

---

nearlas correctamente, por ejemplo– la mano que sostiene el objeto más pesado sufriría entonces una mayor fatiga muscular. Esto daría como resultado la incapacidad de soltar la bola de plomo tan rápidamente como la de madera y, en consecuencia, se vería que la bola de madera avanza más que la de plomo» (Schmitt, «Experience and Experiment», pp. 118-119, n. 95).

orden y detalle cada aspecto de cada asunto era en sí fascinante. Por otro lado, los matemáticos, bajo la guia de Euclides y Arquímedes, contemplaban el mundo en términos de formas geométricas que obedecían a leyes matemáticamente expresables. Aunque muchos aristotélicos advertían la importancia de los experimentos, no lograban apreciar el significado de las matemáticas y, para su perdurable infortunio, se descubrió que el método propio de la física era cuantitativo y no cualitativo.

En su *De Motu*, que no es un libro de texto para estudiantes sino un ensayo erudito sobre el movimiento, Galileo disfruta de la relativa libertad del pensador independiente al que no se exige un compromiso doctrinal rígido. «Como maestro de matemáticas se inclinaba decididamente hacia la metodología de Euclides y Arquímedes, es verdad; pero como investigador de asuntos relacionados con el movimiento de cuerpos pesados y livianos, buscaba esencialmente un enfoque nuevo de un problema –es decir, el movimiento– que había estado durante siglos dentro del campo de los filósofos aristotélicos escolásticos. Demostraba, por lo tanto, una actitud más *abierta* a la introducción de elementos no tradicionales en su investigación.»[15]

Podía también atacar sin temor a Aristóteles, y *De Motu* es tanto un trabajo de protesta como un intento de introducir una nueva solución. Seis capítulos comienzan con la frase algo belicosa *«in quo contra Aristotelem concluditur»*. Galileo asegura: «prácticamente en todo lo que escribió sobre el movimiento local, Aristóteles dijo lo contrario de la verdad.»[16] En otro pasaje, afirma que está «cansado y avergonzado de tener que usar tantas palabras para refutar argumentos tan infantiles y tan ineptas tentativas de sutileza como los que apretuja Aristóteles en todo el libro *De Coelo*».[17] Censura a Aristóteles porque no logra comprender el significado de las matemáticas y se basa en la mera experiencia. «Aristóteles no sólo ignoraba los hallazgos más complejos y profundos de la geometría, sino también los principios más elementales de esta ciencia.» Quienes tratan de defenderle son «todavía más ineptos en geometría».[18] El verdadero maestro a quien volverse es el «divino», el superhumano Arquímedes, «cuyo nombre nunca puedo mencionar sin un sentimiento de veneración.»[19] En realidad, la explicación, en *De Motu*, se concibe casi exclusivamente como la solución arquimediana de un problema geométrico. Por ejemplo, Galileo supone que se puede considerar un volumen como la suma de un número infinito de segmentos

15. Schmitt, «Experience and Experiment», p. 126.
16. Galileo, *De Motu*, *Opere di Galileo*, Vol. I, p. 307. Otro capítulo comienza con las palabras *«in quo error Aristotelis manifestatur»*. Se menciona el nombre de Aristóteles no menos de 109 veces en el breve espacio del tratado de 89 páginas.
17. *Ibid.*, p. 292.
18. *Ibid.*, pp. 302-303.
19. *Ibid.*, pp. 303 y 300.

planos, y utiliza la palanca como un modelo interpretativo para explicar el comportamiento de los cuerpos que suben y bajan.

> Como es utilísimo comparar los cuerpos en movimiento natural con pesos en una balanza, se mostrará esta correspondencia en todo el estudio sobre el movimiento natural.[20]

Al proporcionar a Galileo la palanca (de la cual la balanza es simplemente un caso especial) como medio de reducir el movimiento a un tratamiento cuantitativo, Arquímedes se transforma en el padre de la moderna ciencia de la dinámica. Mediante el principio de las velocidades virtuales, Galileo extendió el principio de la palanca a los problemas de la hidrostática y posteriormente a todas las máquinas simples. En todos los casos, el principio director es la igualdad entre el producto mv en un extremo de la palanca y en el otro. Así, el *momento* de la palanca se transforma fácilmente, por sí sólo, en el *momento* del cuerpo en movimiento. Este modelo involucra la posibilidad de una seria ambigüedad y Galileo cayó en ella sin saberlo. Puesto que ambos extremos de la palanca se mueven sin aceleración en tiempos idénticos, no importa si se usan las velocidades virtuales de los dos pesos o sus desplazamientos virtuales. Las velocidades deben estar en la misma proporción que los desplazamientos; y siempre que Galileo enuncia el principio general de la palanca, lo expresa en términos de velocidad. No parece haber comprendido que la equivalencia se mantiene sólo para la palanca y para los casos análogos en los que una conexión mecánica asegura que cada cuerpo se mueve durante el mismo tiempo, y en los que, debido al equilibrio, el movimiento implicado es un movimiento virtual y no un movimiento acelerado. El caso de la caída libre no cumple las condiciones de equilibrio sobre el plano porque los tiempos implicados no son idénticos, y porque tienen lugar dos movimientos separados y acelerados. Si son iguales los productos de peso por distancia, no puede haber igualdad de momentos *(mv)* sino de energías cinéticas ($mv^2/2$).[21]

La segunda debilidad de Aristóteles, según Galileo, era su confianza acrítica en la experiencia sensorial. Lo ataca por haber afirmado que un cuerpo se mueve con más rapidez en un medio más tenue que en otro más denso «sin otra razón que la experiencia *(et hoc non alia ratione confirmavit nisi ab experientia)*, porque vemos que un cuerpo se mueve más rápido en el aire que en el agua». Galileo opone a éste su propio método:

---

20. *Ibid.*, pp. 259-260. Ver también pp. 274-275.

21. Ver Richard S. Westfall, «Force in Galileo's Physics», en *Galileo Reappraised*, editado por Carlo L. Golino (ed. University of California Press, Berkeley y Los Angeles, 1966), p. 84, n. 22.

> Pero para emplear el razonamiento en todo momento, y no ejemplos (porque buscamos las causas de los efectos, y éstos no se revelan a través de la experiencia), expondremos nuestro propio punto de vista, y su comprobación significará el colapso de la opinión de Aristóteles.[22]

A los ojos de Galileo, la experiencia sin guía ni ayuda puede ser con demasiada facilidad fuente de generalizaciones desviadas: «Sucede algunas veces que ciertas opiniones, por falsas que sean, circulan de modo corriente y duradero entre los hombres, porque ofrecen a primera vista alguna apariencia de verdad y nadie se molesta en investigar atentamente si son dignas de crédito.»[23] El verdadero maestro, Arquímedes, no se dejaba encadenar por las consideraciones empíricas. Por ejemplo, suponía que los pesos suspendidos de una balanza están en ángulo recto, por cuanto se dirigen al centro de la tierra y por lo tanto convergen. «Hizo esto quizá para mostrar que estaba tan por delante de otros que podía extraer conclusiones verdaderas de premisas falsas.» Pero para que el lector no infiera que el maestro se equivoca, Galileo añade: «No debemos sospechar que su conclusión era falsa, porque había demostrado anteriormente la misma conclusión con la ayuda de otra prueba geométrica.»[24]

Por lo tanto, parece claro que el rol de la experiencia y el experimento como factor regulador estaba prácticamente ausente en los escritos iniciales de Galileo. Consideraba que el enfoque matemático era más fructífero y sólo gradualmente, durante el periodo paduano, empezó a comprender la importancia de crear experimentos sistemáticos.

El período paduano

En 1592, con la ayuda de su amigo el Marqués Guidobaldo del Monte, Galileo cambió su cátedra de Pisa por la equivalente de Padua, vacante desde la muerte de Giuseppe Moletti, en 1588.

---

22. Galileo, *De Motu, Opere di Galileo*, Vol. I, pp. 260 y 263. Sugiere luego el uso de un experimento mental como punto de partida: «Si imaginamos *[si mente conciperemus]* que se vuelve gradualmente más ligera el agua en la cual flotan una viga de madera y una pieza pequeña de la misma madera» (*ibid.*, p. 264). Galileo usa la expresión «ensayar» *[periculum facere]* cuatro veces en *De Motu*. Una, con referencia a Aristóteles que no ensaya si el fuego decae cuando se elimina el aire (*ibid.*, p. 377); otra, para observar que el ensayo bien puede mostrar que una esfera no se pone en movimiento mediante una fuerza mínima (*ibid.*, p. 310), y dos veces en relación a sus propios experimentos. Éstos son, primero, el ensayo que revela que los cuerpos no caen de acuerdo con las proporciones que se infieren de los principios hidrostáticos y, segundo, el experimento que pretende demostrar que una bola de madera precede a una de plomo durante un breve período cuando se arrojan juntas (*ibid.*, pp. 273 y 334).

23. *Ibid.*, p. 314.

24. *Ibid.*, p. 300.

No se puede ser profesor de matemáticas en la Universidad del estado más navegante de Italia sin entrar en contacto con los muelles y astilleros. Los gobernadores de la República creían en el uso de la fuerza de trabajo científica –algo que Galileo lamentó más tarde– y no pasó mucho tiempo en Padua antes de que los nobles venecianos solicitaran su consejo profesional. Giacomo Contarini, que fue más tarde uno de los inspectores del astillero, le preguntó si era preferible colocar el tolete en la borda misma del barco o en un soporte exterior. Galileo explicó que el remo funcionaba como una palanca con el punto de apoyo en la pala del remo; y que no importaba la posición del tolete mientras fueran iguales las razones de las distancias entre el punto de apoyo, la fuerza y el peso. Aclaró también que era importante no derrochar fuerza moviendo el agua, que debía quedar tan en reposo como fuera posible. Pocos meses después otro importante patricio veneciano, Alvise Mocenigo, pidió que le explicara la construcción de un farol de aceite mencionado por Herón. Galileo contestó con una paráfrasis del texto de Herón, admitiendo que no tenía muy claro su significado.[25]

Aunque éstos son los únicos encargos semioficiales que, según sabemos con seguridad, recibió Galileo de los miembros de la clase gobernante veneciana, es probable que se le consultara también acerca del riego, que se había convertido en un problema apremiante con el desarrollo, a fines del siglo XVI, del cultivo de arroz y maíz en los territorios venecianos del valle del Po. De todos modos, Galileo pronto se interesó en el problema y hacia el fin de 1593 solicitó la patente de una bomba, impulsada por caballos, para elevar agua y regar los campos. El 18 de febrero de 1594, los funcionarios de patentes informaron que no habían visto la máquina de Galileo ni un modelo de ella, y aconsejaron que se le diera patente por veinte años en lugar de los cuarenta que había solicitado. El Senado se la otorgó el 15 de septiembre del mismo año. Sin embargo, no parece que haya construido un modelo práctico de su máquina hasta 1602.[26] Esto parecería indicar que no le entusiasmaba mucho aplicar los frutos de su invención o que tenia escaso incentivo para hacerlo. Si bien Galileo no recibió apremiantes demandas de aplicaciones prácticas de su ciencia matemática, tenía amigos –como, en especial, Gianfrancesco Sagredo y Paolo Sarpi– interesados en diversos aspectos de la tecnología. Desde que conocieron *De magnete* de Gilbert, en 1602,

25. Carta a Giacomo Contarini, 22 de marzo de 1593, *Opere di Galileo*, Vol. X, pp. 55-57; carta a Alvise Mocenigo, 11 de enero de 1594, *ibid.*, pp. 64-65.

26. Niccolò Fabri di Peiresc escribió a Galileo el 26 de enero de 1634: «Hace ya más de treinta años que... vi el ensayo exitoso de su pequeño modelo de una máquina para elevar el agua, si recuerdo correctamente, en los jardines de la ilustre familia Contarini (*ibid.*, Vol. XVI, p. 27). Sugiere la fecha de 1602 una carta de Galileo a Baccio Valori, el 26 de abril de 1602, en la que le promete que le mostrará un modelo de su invención en el próximo verano (*ibid.*, Vol. X, pp. 87-88).

estudiaban y repetían sus experimentos con piedra imán. Sagredo tenía capacidad para la fabricación de instrumentos. Diseñó una máquina para hacer tornillos, confiando en la ayuda de Galileo para obtener herramientas y artesanos capacitados. Paolo Sarpi estaba más interesado en los problemas teóricos, y fue en respuesta a uno de sus interrogantes que Galileo formuló por primera vez la ley correcta de la caída libre, deducida, sin embargo, de la suposición errónea de que la velocidad es directamente proporcional a la distancia.[27]

Una gran cantidad de estudiantes a quienes Galileo daba instrucción privada eran jóvenes nobles interesados, principalmente, en la aplicación de la geometría y las matemáticas a los problemas prácticos de la guerra. Galileo les proporcionó una guía elemental sobre campamentos, fortificaciones y sitios. También para ellos perfeccionó un compás geométrico militar al que adaptó algunas características de instrumentos anteriores y que comenzó a vender, a buen precio, ya en 1597. Dos años más tarde, Marcantonio Mazzoleni, un capaz artesano, entró a su servicio, y parece que desde ese momento fue el principal responsable de los compases y del control de los instrumentos, y posteriormente las lentes, producidos en el taller de Galileo.

Además de dar clases sobre Euclides y Ptolomeo como había hecho en Pisa, Galileo enseñaba también la *Esfera* de Sacrobosco y la *Mecánica* de Aristóteles. Esta última serie de clases fue el origen de un pequeño pero importante trabajo, *Sobre la mecánica*, en el que Galileo extendía el principio de la palanca, mediante el principio de las velocidades virtuales, a las máquinas simples: el torno, el cabrestante, la polea, el tornillo y el tornillo de Arquímedes. Galileo mencionaba las aplicaciones útiles que se podían derivar de la ciencia de la mecánica y de sus instrumentos; pero su intención principal era disipar la ilusión de algunos ingenieros que se creían capaces de engañar a la naturaleza superando una fuerza más grande con una más pequeña.[28]

Durante este período, Galileo realizó también experimentos sobre la medición de la temperatura. Al recordarlo en una carta a Ferdinando Cesarini del 29 de septiembre de 1638, Benedetto Castelli escribe:

> Recuerdo un experimento que Galileo hizo hace más de treinta años. Tomó un frasco de cristal de la medida de un huevo de gallina con un cuello de dos palmos de largo y tan estrecho como una paja. Calentó el frasco con las manos e introdujo el extremo abierto en un recipiente que contenía un poco de agua. Cuando apartó el calor de su mano, el agua se elevó instantáneamente más de un palmo en el cuello del frasco. Galileo utilizó

27. Carta a Paolo Sarpi, 16 de octubre de 1604, *ibid.*, Vol. X, pp. 115-116.
28. Galileo, *De Mechanica*, *ibid.*, Vol. II pp. 155-157.

> posteriormente este efecto, construyendo un instrumento para estudiar los grados de calor y frío.[29]

Por lo tanto, el instrumento consistía en un tubo de cristal que terminaba en una ampolla. El aire del tubo era parcialmente expulsado por el calor y reemplazado con el agua de un recipiente donde se sumergía el extremo abierto. La expansión o contracción del aire encerrado en la ampolla indicaban así los diferentes grados de temperatura. Como el agua estaba en su máximo nivel durante el tiempo más frío, la escala era el reverso de la que se usa actualmente en los termómetros. Galileo no sospechaba el fenómeno de la presión barométrica y dejó sin cerrar la abertura del tubo. Esto hacía imposible distinguir entre los efectos expansivos y contractivos del calor y del frío, y el efecto de la variación de la presión atmosférica; y el instrumento era muy poco digno de confianza.

En 1609, Galileo había pasado diecisiete años fuera de su querida Florencia y ansiaba regresar a su tierra natal. Durante algún tiempo había cultivado asiduamente a sus amigos en la corte toscana, y en ese año solicitó al Gran Duque su nombramiento como filósofo y matemático. Por su carta a la Secretaría de Estado florentina sabemos que se proponía escribir sobre el sonido y el habla, la luz y los colores, y los movimientos de los animales. No existen pruebas de que emprendiera realmente trabajos sobre estos temas mientras estaba en Padua; y después de su traslado a Florencia abandonaba el proyecto. Sin embargo, tenemos indicios de que estaba interesado en la hidrostática y de que hizo experimentos con cuerpos de densidades variables. Este problema lo ocupó durante los primeros años de su regreso a Florencia.

Galileo quizás habría experimentado dificultades considerables en asegurarse el puesto al que aspiraba en la corte toscana si no hubiera sido por su feliz invento del telescopio y por la idea, aún más feliz, de apuntar con él a las estrellas. A comienzos del verano de 1609 Galileo, en Venecia, oyó que un tal Fleming había construido un anteojo con el cual se veían más cerca los objetos distantes. A su llegada a Padua se abocó a la tarea de combinar lentes y pronto encontró una combinación afortunada de un cristal convexo y otro cóncavo. Su primer telescopio tenía tres aumentos pero pronto construyó otro de ocho aumentos que regaló al gobierno veneciano en agosto. Como recompensa a su invento, recibió un importante aumento de salario y una cátedra permanente en la Universidad de Padua. A fines de 1609, Galileo había perfeccionado su telescopio (quizá con la ayuda de su fabricante de instrumentos) hasta una amplificación de treinta aumentos. Lo dirigió entonces hacia el cie-

29. Carta a Ferdinando Cesarini, 29 de septiembre de 1638, *ibid.*, Vol. XVII, p. 377. Ver también la carta de Galileo a Cesare Marsili, 25 de abril de 1626, *ibid.*, Vol. XIII, p. 320.

lo, y en marzo de 1610 su nuevo instrumento descubría la existencia de estrellas desconocidas, revelaba la naturaleza de la Vía Láctea, mostraba que la luna estaba cubierta de montañas y depresiones y enseñaba que Júpiter tenía cuatro satélites. Galileo publicó estas noticias, realmente sensacionales, en un folleto de veintinueve páginas titulado *Sidereus Nuncius*. Alcanzó la fama de la noche a la mañana, y el Gran Duque se mostró ansioso de dar la bienvenida a tan distinguido súbdito.[30]

El siglo XVII fue eminentemente la época en que se impuso la idea de la experimentación. Con frecuencia se atribuye al joven Galileo la idea de que el experimento es la ruta principal para el progreso del conocimiento. Podemos concluir que este punto de vista es muy simplista. Galileo llegó a interesarse, pero de ningún modo exclusivamente, por algunos aspectos de la tradición de los artesanos durante sus veinte años en Padua. Contestó a preguntas sobre la posición más adecuada de los toletes y sobre la construcción de faroles, construyó compases, estudió problemas de ingeniería militar, experimentó con imanes, diseñó un modelo para una bomba de agua e inventó un termómetro primitivo. Sin embargo, continuó siendo un matemático en su método y en su perspectiva. Su reacción instintiva era hallar las propiedades del comportamiento de los cuerpos, al buen estilo de Arquímedes, a partir de las consideraciones geométricas del movimiento o del equilibrio sobre el modelo de la palanca. Cuando realizaba un experimento, era generalmente para ilustrar una conclusión a la que había llegado a través de un razonamiento matemático. Lo novedoso del enfoque de Galileo, en comparación con el de sus opositores aristotélicos, no estaba tanto en su actitud hacia la experimentación como en su confianza acerca de la relevancia de las matemáticas.

---

30. Para un excelente relato de estos incidentes, ver Stillman Drake, *Galileo Studies*, pp. 140-158.

2

LA HIDROSTÁTICA Y EL USO REGULADOR DE LOS EXPERIMENTOS

I. La historia del debate

Cuando Galileo solicitó un cargo en la Corte toscana en 1609, insistió tanto en el título de filósofo como en el de matemático del Gran Duque, a quien aseguraba «que he estudiado mayor cantidad de años la filosofía que de meses las matemáticas puras». Prometía a Belisario Vinta, el Secretario de Estado, que justificaría sus pretensiones «cuando sus Altezas se complazcan en darme la oportunidad de debatir con los hombres más distinguidos de la profesión».[1]

Esa oportunidad surgió en el verano de 1611, cuando algunos profesores en vacaciones de la Universidad de Pisa se reunieron con jóvenes caballeros florentinos en la villa de Filippo Salviati, cerca de Florencia, para unos debates informales. Galileo fue un participante regular y éste fue el origen del debate sobre los cuerpos flotantes. El tema de los principios hidrostáticos no apareció de inmediato. El punto en discusión era filosófico y se refería a las cualidades del calor y del frío. Alguien presentó el hielo como un ejemplo de la posición peripatética de que la acción del frío consistía en condensar. Galileo sugirió que, como el hielo era más ligero que el agua, la naturaleza real del frío era la rarefacción. El filósofo lo negó y procedió luego a explicar la flotación del hielo por su forma y no por su densidad. Galileo replicó que el hielo flota cualquiera sea su forma, pero no logró convencer a su oponente, quien se marchó y regresó tres días más tarde diciendo que había encontrado a alguien que, «mediante razones y experimentos», demostraría que Galileo se equivocaba. Era Lodovico delle Colombe, o Colombo: un filósofo aficionado, autor de un panfleto contra el movimiento de la tierra que Galileo se había negado a contestar.

El equipo experimental de Colombo consistía en piezas de ébano, algunas en forma de láminas delgadas, y otras esféricas o cilíndricas. Puesto que las primeras flotaban y las otras se hundían invariablemente,

1. Carta a Belisario Vinta, 7 de mayo de 1610, *Opere di Galileo*, Vol. X, p. 353.

concluía que la forma afectaba al flotamiento de los cuerpos. Repitió esta experiencia en varios sitios públicos. Intercambió cartas con Galileo, y finalmente arreglaron las condiciones de un debate público cuyos jueces serían Francesco Nori y Filippo Arrighetti. Por razones todavía oscuras, Colombo no acudió a la casa de Nori en la fecha indicada, y Galileo no se presentó en la villa de Salviati en otra ocasión. Para ese momento, sin embargo, la controversia había adquirido notoriedad, y los adversarios de Galileo la utilizaban para desacreditarlo ante la corte. Cosimo II reprendió amablemente a Galileo y exaltó la pluma como el único camino para solucionar esta clase de disputa. De acuerdo con el pedido del Gran Duque, Galileo escribió un ensayo de quince páginas donde esbozaba los principales argumentos de su posición.

En una fase posterior del debate, en la que Colombo no estuvo presente, Galileo libró nuevas discusiones cuando el filósofo Papazzone visitó la corte en algún momento entre el 11 de septiembre y el 11 de octubre de 1611. Como ocurrió que los cardenales Maffeo Barberini y Ferdinando Gonzaga estaban en Florencia en ese momento, el Gran Duque invitó a Galileo y a Papazzone a repetir sus argumentos ante los distinguidos visitantes. Fue en esta ocasión que el cardenal Barberini tomó partida por Galileo, mientras el cardenal Gonzaga apoyaba la posición peripatética.

Inmediatamente después, Galileo cayó enfermo. Como resultado, transcurrieron unos meses antes de que pudiera desarrollar su ensayo inicial y escribir el *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, que salió de la imprenta hacia fines de mayo de 1612 y se agotó tan pronto que Galileo preparó una segunda edición antes del fin de ese año.[2] En agosto se publicó una réplica de un profesor pisano que firmaba «Accademico Incognito», y que Antonio Favaro identificó como Arturo Pannochieschi de' Conti d'Elci, inspector de la Universidad. Siguieron su crítica moderada y a veces festiva los cáusticos ataques de Giorgio Coresio, catedrático de griego de Pisa, Lodovico delle Colombe y Vincenzio di Grazia, profesor de filosofía de Pisa. Benedetto Castelli preparó una refutación a Coresio, pero decidió no imprimirla cuando Coresio, ortodoxo griego, se vio envuelto en serias dificultades con las autoridades eclesiásticas. Sin embargo, Colombo y di Grazia fueron conjuntamente rebatidos por Galileo en un trabajo publicado en 1615.

El debate sobre la hidrostática comenzó como una discusión amistosa pero acabó en un enfrentamiento amargo. Con la excepción del Accademico Incognito, los adversarios de Galileo hacían con frecuencia ata-

2. Éste es el único de sus libros que ha recibido de su mano un tratamiento semejante, a pesar de sus promesas de reeditar el tratado sobre el compás y el *Sidereus Nuncius*. Para la historia de los sucesivos borradores de su trabajo, ver Stillman Drake, *Galileo Studies* (ed. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1970), pp. 159-176.

ques personales, y Galileo les correspondía con la misma moneda. Fue un error táctico, puesto que demostró su capacidad para el título de filósofo al precio de la estima general de que gozaba al llegar de Padua. Galileo, capaz de reír ante la derrota de un adversario, carecía singularmente de humor para aceptar una broma contra él. Con todo, sabiendo que no podía contestar a un oponente sin perder la calma, esperó dos años antes de entregar a la imprenta su réplica. Pero al permitir que Castelli la firmara, daba la impresión de que responder a las objeciones de sus colegas estaba por debajo de su nivel. No se podía esperar que ellos olvidaran este desprecio.

II. EL DISCURSO ACERCA DE LOS CUERPOS FLOTANTES

Al principio mismo del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, Galileo destaca la importancia de recordar «la causa real, intrínseca y total» por la que algunos cuerpos flotan mientras que otros se hunden, puesto que lo escrito por Aristóteles sobre el tema no es satisfactorio.[3] «La causa por la que algunos sólidos se hunden», escribe, «es el exceso de su peso por encima del peso del agua».[4] Aunque esto lo había demos-

---

3. *Discorso intorno alle cose che stanno in sù l'acqua o che in quella si muovono. Opere di Galileo*, Vol. IV, p. 67. Literalmente, *Discurso acerca de las cosas que están sobre la superficie del agua, o que en ella se mueven.* (*N. del t.:* el autor utiliza la versión resumida *Discourse on Floating Bodies*, que mantenemos en esta traducción como *Discurso acerca de los cuerpos flotantes.*) El pasaje de Aristóteles que Galileo evoca es el último capítulo del libro IV de *De Coelo.*

4. Galileo utiliza la palabra «cagione» que significa «causa», pero también, más vagamente, «razón para». Es difícil traducir a Galileo sin hacer que parezca más avanzado, en las distinciones conceptuales, de lo que era realmente. Un ejemplo clásico de este contratiempo se halla en algunas versiones al inglés del *Discurso acerca de dos nuevas ciencias* (como la traducción de Crew-De Salvio), donde *gravità in ispecie* se transforma en *specific gravity* (gravedad específica), para gran riesgo del lector imprudente. (*N. del t.:* En las dos traducciones al español del *Discurso* que conocemos, *gravità* y *gravità in ispecie* aparecen como *peso* y *peso específico*, lo que modera dicho riesgo.) María Luisa Altieri Biagi hace una importante contribución al establecimiento de varios matices de la terminología de Galileo en *Galileo e la terminologia tecnico-scientifica* (ed. Olschki, Florencia, 1965), pero exagera a veces el conocimiento de Galileo sobre los puntos conceptuales más delicados. Para no caer en el deseo de ganar claridad a costa de la precisión, enumeraré unas pocas palabras que aparecen con frecuencia en los escritos de Galileo y que carecen del bien definido significado de sus equivalentes modernas:

(a) *mole* se ha traducido como *masa* y *volumen;* esta última es más precisa, pero quizás excesiva. A veces *tamaño* se acerca más al significado original indiferenciado de *mole.*

(b) *gravità:* Galileo la utiliza habitualmente en lugar de *peso.* No posee ninguna connotación del concepto newtoniano de gravedad. *Gravità in ispecie* es un término técnico, pero no se limita a la comparación de las densidades de una sustancia y de un medio líquido.

(c) *velocità* indica indistintamente *velocidad* y *aceleración.* Se suele olvidar esto, en detrimento de la debida comprensión de las dificultades que enfrentaban los científicos del siglo XVII.

trado Arquimedes en su trabajo *Sobre los cuerpos flotantes*. Galileo intenta «alcanzar la misma conclusión con un método diferente y con otros medios, reduciendo las causas de tales efectos a principios más intrínsecos e inmediatos». Esto no implica, sin embargo, que quisiera desviarse del ideal de la rigurosa deducción matemática: «Como lo requiere el método demostrativo, defino ciertos términos y explico ciertas proposiciones que utilizo como principios verdaderos y obvios.»[5]

En primer lugar, los dos términos básicos:

> Llamo igualmente pesados *in ispecie* a aquellos materiales cuyos volúmenes iguales pesan lo mismo... Pero llamo igualmente pesados, en peso absoluto, a dos sólidos del mismo peso, aunque no sean iguales de tamaño.[6]

Luego, los dos principios básicos:

> Tomo prestados dos principios de la ciencia de la mecánica. El primero es que los pesos absolutamente iguales que se mueven a velocidades iguales tienen la misma fuerza y momento en su operación... El segundo principio es que la velocidad aumenta el momento y la fuerza del peso.

Galileo interpreta estos principios con la ayuda de la palanca. Para el primer principio, utiliza una balanza de brazos iguales de los cuales penden dos pesos idénticos:

(d) *virtù* y *forza* presentan especiales problemas. Se pueden traducir como *dureza, energía* o *fuerza*, según el contexto. Para *forza*, ver Richard S. Westfall, «The Problems of Force in Galileo's Physics», en *Galileo Reappraised*, ed. Carlo L. Golino (University of California Press, Berkeley y Los Angeles, 1966), pp. 67-95; ver también M. Jammer, *Concepts of Force* (ed. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1957), pp. 94-103.

(e) *momento* es ya un término técnico, pero no tiene un único equivalente moderno. Equivale a veces a *momento estático* y otras a *momentum*. Nunca se refiere a uno solo: siempre a los dos, con mayor énfasis en uno u otro, según el contexto.

(f) *impeto* es, con frecuencia, intercambiable por *momento*; pero *momento* es más general y se refiere a situaciones estáticas y dinámicas, en tanto que *impeto* supone la idea de movimiento y tiene un uso más restringido. Ver Galileo, *Discorsi intorno a due nuove scienze*, ed. L. Geymonat y A. Carugo (Boringhieri, Turín, 1958), p. 783, nota 215.

5. Galileo, *Discurso acerca de los cuerpos flotantes, Opere di Galileo*, Vol. IV, p. 67. Galileo compartía una ambición de los matemáticos de su época: demostrar por otros medios (y, preferentemente, más simples) lo que Arquímedes había descubierto. Michel Coignet felicitaba a Galileo por su éxito: «He recibido su demostración del centro de gravedad de la parábola con gran admiración, porque (dicho sea con toda modestia) la encuentro mucho más fácil y más práctica que las propias pruebas de Arquímedes» (carta a Galileo, 31 de marzo de 1588, *ibid.*, Vol. X, pp. 31-32).

6. *Ibid.*, *Gravità in ispecie* deriva probablemente del tratado medieval *De insidentibus in humidum* (ver E. Moody y M. Clagett, *Medieval Science of Weights* [ed. University of Wisconsin Press, Madison, 1961], pp. 91-93, 113-115 y, para las implicaciones metodológicas, 673-676).

> Si la balanza se moviera, los pesos recorrerían espacios iguales en el mismo tiempo, es decir, se moverían a velocidades iguales, y por tanto no habría ninguna razón para que un peso descendiera más que el otro. Por lo tanto, se establece el equilibrio, y sus momentos se mantienen de igual fuerza (virtù).

El segundo principio se ilustra con una balanza o romana de brazos desiguales. En este caso, los dos pesos iguales no ejercen la misma fuerza, pero el que está a una distancia mayor del centro desciende y el otro sube de tal manera que:

> el movimiento del que asciende es lento, mientras que el movimiento del otro es rápido. La fuerza y virtud conferida por la velocidad al cuerpo que se mueve es tal que puede compensar exactamente el peso adicional del cuerpo que se mueve más lentamente.[7]

Los contemporáneos de Galileo estaban familiarizados con estos principios por el seudoaristotélico *De Mechanica*, donde se argumentaba que un peso determinado sobre el brazo de una palanca tenía una efectividad mayor sobre un brazo más largo porque tenía mayor velocidad, es decir, describía un arco mayor en el mismo tiempo. Si los pesos libres son inversamente proporcionales a las velocidades, la efectividad total de cada peso será la misma y se obtendrá el equilibrio. Se sigue que como las longitudes del brazo son directamente proporcionales a los desplazamientos potenciales simultáneos del área, se producirá el equilibrio cuando los pesos libres sean inversamente proporcionales a las longitudes de los brazos de la palanca. Lo que asombraba a los lectores de Galileo era su uso de la palabra momento para la fuerza combinada de peso y velocidad. Como señalaba el Accademico Incognito: «Esta palabra *momento* es latina y ptolomeica y no se usa, en el sentido referido, en nuestro vernáculo moderno, y menos aún en el antiguo, puesto que no existe ningún ejemplo de ella en el copioso y exquisito Vocabulario della Crusca».[8] En una apostilla, comentaba Galileo: «En vuestro vernáculo, no sólo no se encuentra esta palabra *momento*, sino ninguna de las palabras más comunes en todo el campo de las matemáticas»; y en la segunda edición de su *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, introducía la siguiente definición de momento:

---

7. *Ibid.*, pp. 68-69.

8. *Considerazioni... da Accademico Incognito* (Pisa, 1612), *Opere di Galileo*, Vol. IV, p. 158. En la segunda edición del *Vocabolario della Crusca* (Venecia, 1623) se añadió el sentido técnico de *momento*: «quella forza, peso, o violenza, che acquistano i corpi gravi nel muoversi naturalmente verso il loro centro, termine di meccanica. Onde per metaf. cosa li momento. cosa d'importanza».

> El momento, entre los mecánicos, significa esa virtud, esa fuerza y esa eficacia con la cual el motor mueve y el móvil resiste; esa virtud no depende sólo del peso, sino también de la velocidad y de las diversas inclinaciones de los espacios en los que se produce el movimiento, porque un cuerpo que desciende gana más ímpetu en una cuesta empinada que en una menos empinada. Y, cualquiera sea la causa de esa virtud, conserva siempre el nombre de momento. No me parece que este sentido pueda considerarse nuevo en nuestra breve narración, porque, si no me equivoco, decimos a menudo: «Este es un asunto grave, pero aquél es de escaso momento», y: «Consideramos las cosas ligeras y pasamos por alto aquellas de gran momento», metáforas que, creo, se han tomado de la mecánica.[9]

Galileo ya había definido el momento en términos de peso y velocidad en su trabajo *Sobre la mecánica* y esto le permitía el uso práctico del principio de las velocidades virtuales. Es el mismo concepto que aplica ahora el problema de los cuerpos flotantes. Este método, sin embargo, está anunciado en el seudoaristotélico *De Mechanica*, como reconoce el mismo Galileo: «Se encuentra esta correspondencia entre el peso y la velocidad en todos los instrumentos mecánicos, y Aristóteles la considera como un principio en su *De Mechanica*.» Esta declaración es inesperada porque Galileo presentaba sus observaciones sobre el método declarando que no estaba satisfecho con la descripción de Aristóteles. ¿Por qué había de apartarse de un enfoque estrictamente arquimediano? A pesar de su fidelidad al método de demostración matemático deductivo en hidrostática, no usó los axiomas o los teoremas de Arquímedes como base para su deducción. Esto, por lo que sé, nunca se ha explicado satisfactoriamente. Es cierto, por supuesto, que la doctrina de Arquímedes, aunque clara y rigurosa, carece de generalidad. Las leyes de la palanca, tal como él las formuló, descansan sobre hipótesis limitadas al caso inicialmente considerado de dos pesos suspendidos de los brazos de una balanza. Cuando abordó el problema de los cuerpos flotantes, tuvo que apelar a principios que no estaban relacionados con los postulados establecidos al comienzo de su tratado *Sobre el equilibrio de los planos*. Pero esto es predecir el hecho cuando ya ha ocurrido, puesto que sólo por la improductividad histórica de los principios arquimedianos sabemos de su esterilidad. Galileo no podía haber sabido esto sin advertir el fracaso de otros o sin aprender de sus propios esfuerzos infructuosos que la hidrostática no se podía extender deductivamente a partir de los postulados de Arquímedes. Habría sido sorprendente, por cierto, que no hubiese tratado de utilizar las premisas de Arquímedes como base para la deducción. En realidad, tenemos pruebas concluyentes de que hizo ese intento, y sólo cuando fracasó, se orientó hacia el *De Mechanica* aristoté-

9. Galileo, *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*. *Opere di Galileo*. Vol. IV, p. 68.

lico. La comparación del primer borrador del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes* y la versión publicada muestran algo más que enmiendas del texto; revelan un cambio completo en la demostración principal de Galileo.

El primer borrador no toma dos principios de la mecánica; propone dos axiomas de Arquímedes:

> A fin de proceder a la demostración, tomo prestado uno de los dos axiomas siguientes, y supongo –si todas las demás circunstancias son idénticas– que un peso menor no puede elevar y levantar un peso mayor; o que, la verdad, el orden natural exige que los cuerpos más pesados estén debajo de los menos pesados.[10]

Se puede considerar este primer axioma como un principio intuitivamente evidente en sí; o si se prefiere, ya que es obvia la referencia a la palanca, una versión simplificada del postulado II de Arquímedes del Libro I de *Sobre el equilibrio de los planos*. El segundo axioma es una interpretación física de la Proposición VII del Libro I del tratado de Arquímedes *Sobre los cuerpos flotantes*. Con la ayuda de estos axiomas, Galileo intenta demostrar que un sólido más liviano que el agua flota necesariamente en ese medio. Ofrece dos demostraciones en las que utiliza sucesivamente el primero y el segundo axioma.

En la primera demostración, coloca un sólido, más ligero que un volumen equivalente de agua, en un tanque lleno en parte de agua. Si el sólido se hunde, elevará un volumen del agua igual al propio. Pero esto es imposible, ya que un volumen igual de agua es más pesado que el sólido, y el primer axioma impide que un peso menor eleve a uno mayor. El sólido, por lo tanto, no puede sumergirse completamente.

Esta demostración es una elegante *reductio ad absurdum* digna del propio Arquímedes, pero se origina en la suposición falsa de que el volumen de agua desplazado cuando se sumerge un sólido es igual al volumen total del sólido sumergido, en tanto que sólo es igual al volumen de la parte del sólido que está por debajo del nivel inicial del agua. En su *De Motu*, Galileo había presentado dos veces este argumento prácticamente en la misma forma.[11] El hecho de que el «Padre de la ciencia experimental» pudiera cometer ese error después de veinte años de enseñar en la Universidad señala quizá su enfoque real de los problemas físicos.

La segunda demostración, que quedó incompleta, contiene el mismo error. El sólido más liviano flotaría, afirmaba, porque «el agua elevada siempre es igual en volumen al volumen del sólido que se sumerge».[12]

---

10. *Ibid.*, Vol. IV, p. 36.
11. *De Motu, ibid.*, Vol. I, pp. 256 y 351-352.
12. *Ibid.*, Vol. IV, pp. 37-38.

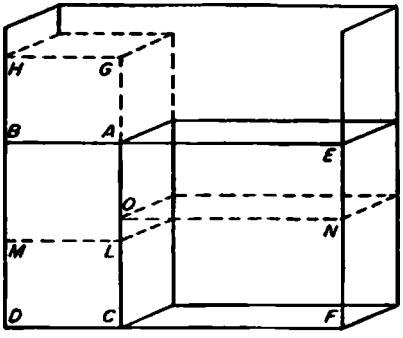


FIGURA 1

En algún momento entre octubre de 1611 y marzo de 1612, Galileo reconoció la falacia de su argumento. En un pasaje del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes* –que podríamos considerar erróneamente un ataque a sus adversarios– a quien refuta, en realidad, es a sí mismo en una época anterior.

> Es manifiesta la necesidad de comparar el peso del agua y el de los sólidos. Esta comparación puede parecer, a primera vista, suficiente para concluir y determinar qué sólidos flotan y cuáles se hunden, al sostener que sobrenadan los de menor peso específico *(mens gravis in ispecie)* que el agua, mientras que se hunden los de mayor peso específico. Porque parece que, cuando se hunde un sólido, eleva tanta agua como la parte del sólido que se sumerge. Es imposible, por lo tanto, que un sólido de menor peso específico que el agua se hunda por completo, puesto que no podría elevar un peso mayor que el propio... El asunto, sin embargo, se desarrolla de otro modo; y aunque sean ciertas las conclusiones, las causas aducidas son incorrectas. No es cierto que, al hundirse, un sólido eleva y desplaza un volumen de agua igual a la parte sumergida del sólido. El agua elevada siempre es menor que la parte sumergida del sólido, y será tanto menor cuanto más estrecho sea el recipiente que contiene el agua.[13]

Puesto que Galileo no dice una palabra acerca de su error inicial, sólo podemos conjeturar cómo lo descubrió. Hay claras señales de que no lo hizo mediante experimentos, sino extrayendo las diversas proporciones geométricas que buscaría normalmente un matemático experimentado. En la primera edición del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, Galileo empieza por demostrar que si se eleva del agua, parcialmente, un sólido rectangular, la razón entre la caída del agua y el ascenso del sólido

13. Galileo, *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, *ibid.*, p. 70.

es igual a la razón entre la base del sólido y la superficie del agua que lo rodea. Se coloca un cuerpo rectangular *BDCA* en un recipiente lleno de agua hasta el nivel *AE* (figura 1). El cuerpo *BDCA* se alza luego hasta la posición *HMLG*, mientras el nivel del agua baja hasta *ON*. *HBAG*, el volumen de la parte del sólido que se eleva por encima del agua, es igual a *AONE*, el volumen del agua que ha bajado. Como las bases de volúmenes iguales son inversamente proporcionales a sus alturas,

$$\frac{OA}{AG} = \frac{GH}{NO}$$

es decir

$$\frac{\text{caída del agua}}{\text{ascenso del sólido}} = \frac{\text{base del sólido}}{\text{superficie del agua}}$$

Galileo ilustra la conclusión de este teorema con la ayuda del ejemplo siguiente: si una columna cilíndrica, situada en un estanque de diámetro 25 veces mayor, se eleva verticalmente un brazo,* el agua del estanque bajará la veinticuatroava parte de un brazo; mientras que si está en un pozo apenas 1/8 más grande que la columna, y se eleva ésta igual que antes, el agua del pozo bajará 7 brazos. Esto sugiere que se podría encontrar una aplicación útil para el concepto de momento; pero el concepto mismo no aparece en la prueba formal del teorema.

Este teorema está a un paso del siguiente, que Galileo emplea en la segunda edición del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes* cuando investiga la razón entre el volumen del agua elevada y el volumen del sólido sumergido (figura 2).

Supongamos que el agua del recipiente está al nivel *EFG* antes de sumergir el cuerpo rectangular *HIK*. Cuando se sumerge *HIK*, el nivel del agua sube hasta *LM*. Ahora bien, el volumen del agua que sube es el volumen del área *LG*. Pero el volumen *LG* no es igual al volumen *HIK* sino al volumen *EIK* contenido bajo el primer nivel *EFG*. Como

* El *braccio* (que significa literalmente «brazo» y cuyo plural en italiano es irregular, *braccia*) es una antigua medida italiana de agrimensura y textiles, que variaba según las regiones, de 0,530 m en Reggio a 0,683 en Venecia; y también según el tipo de tela que midiera (en la misma Venecia, 0,683 para la lana y 0,639 para la seda). 60 centímetros sería una aproximación cómoda para el lector español, aunque el autor da una medida algo menor (ver más adelante, p. 188), de 22 pulgadas, es decir 0,5588 m.

En una de las dos traducciones castellanas de los *Discorsi* (ed. Nacional, Madrid, 1976) se vierte *braccia* como «brazas»; en la otra (ed. Losada, Buenos Aires, 1945) como «codos», utilizando el nombre de una antigua medida española de similar dimensión (el *codo mayor* medía 0,552 m y el *codo real* 0,574). *(N. del t.)*

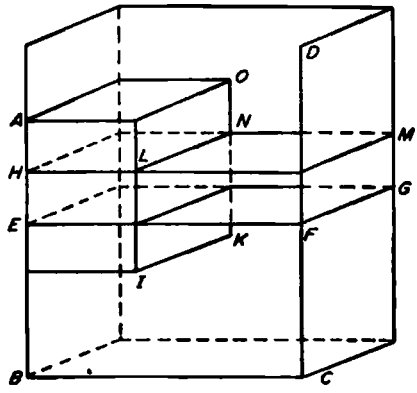


FIGURA 2

volumen LG = volumen EIK

sumando el volumen EN a ambos,

volumen EM (es decir, volumen EN volumen NF) = volumen HIK

Por consiguiente

$$\frac{\text{volumen } LG}{\text{volumen } EM} = \frac{\text{superficie } LM}{\text{superficie } MH}$$

y

$$\frac{\text{volumen } LG}{\text{volumen } HIK} = \frac{\text{superficie } LM}{\text{superficie } LM \quad \text{base del cuerpo } HN}$$

Por lo tanto, la razón entre el volumen del agua que sube y el volumen del sólido sumergido es la misma que la razón entre la superficie del agua circundante y la misma superficie más la base del sólido. Nuevamente, aquí, la demostración es euclidiana por su simplicidad, y no hace referencia directa al principio de las velocidades virtuales. Pero es crucial, puesto que establece que la suposición inicial de Galileo era falsa: el volumen del agua que sube cuando se sumerge un sólido no es igual al volumen total del sólido sumergido sino sólo el volumen de la parte que está debajo del nivel inicial del agua.[14]

14. *Ibid.*, pp. 71-73.

Si el segundo teorema demuestra que no es conveniente un enfoque estrictamente arquimediano, el primer teorema sugiere la utilidad del concepto de momento. Galileo comprende que no es suficiente considerar los pesos relativos, sino que se deben tomar en cuenta los desplazamientos virtuales. Este descubrimiento lo llevó de vuelta a *De Mechanica*. Mientras que en el borrador del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes* simplemente habla de presentar una prueba más clara que la encontrada en Arquímedes, en la versión publicada establece que intenta proceder «con un método diferente y con otros medios» y no los usados por Arquímedes. Confía que este nuevo enfoque le permitirá «descubrir las causas de algunos efectos admirables y casi increíbles, como el de una pequeñísima cantidad de agua que eleva y sostiene con su ligero peso un sólido que pesa cien y mil veces más que ella». Espera alcanzar esto

> comparando los momentos de la resistencia del agua, al ser elevada, con los momentos del peso del sólido que presiona hacia abajo. Si los momentos de la resistencia del agua son iguales a los momentos del sólido antes de su inmersión total, se establecerá entonces, sin duda, el equilibrio y el sólido no se hundirá más.[15]

Con la ayuda del concepto de momento, Galileo deduce dos teoremas nuevos: primero, que un sólido menos denso que el agua sube cuando es sumergido; y segundo, que el mismo sólido, colocado en el fondo de un recipiente, no flota hasta que su altura total alcanza, con la altura del agua, la misma razón que hay entre la densidad del agua y la densidad del sólido.

El hecho de que estos dos teoremas sean los únicos demostrados con ayuda del concepto de momento corrobora la idea de que Galileo no llegó al método correcto realizando experimentos, sino utilizando el razonamiento matemático. También confirma esto la sorpresa causada por el corolario de que un sólido puede flotar en una muy pequeña cantidad de agua si el agua sube a tal altura que un volumen de agua equivalente al volumen del sólido sumergido pesa tanto como todo el sólido.

> A primera vista, esto quizás parezca a muchos una gran paradoja, y despierta la duda de que la demostración de tal efecto sea sofística y falaz. Pero... está de por medio el experimento *(c'è l'esperienza di mezzo)*, que dará seguridad a quienes sientan esta sospecha.[16]

Las demostraciones geométricas pueden llevar a conclusiones sorprendentes que deben ser ensayadas y verificadas, pero es el análisis matemá-

15. *Ibid.*, pp. 67 y 70.
16. *Ibid.*, p. 77.

tico lo que atrae la atención a los fenómenos extraordinarios, y no los fenómenos extraordinarios los que reclaman una interpretación matemática. Los hechos curiosos y asombrosos existen siempre, por supuesto; pero permanecen ocultos, o se consideran irrelevantes, hasta que se reconocen como una parte de un modelo explicativo. Los errores que cometió Galileo en su primer borrador del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes* le enseñaron que un matemático puede alcanzar conclusiones correctas por motivos incorrectos, y esto agudizó su conciencia del uso regulador de los experimentos. La versión impresa del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes* no abandona, sin embargo, el enfoque matemático: Galileo avanza aún a partir de postulados físicos geometrizados, a pasos deductivos formales, hasta diversos teoremas; pero reemplaza el razonamiento matemático exclusivamente abstracto de Arquímedes con la técnica más inferencial de introducir apelaciones a la experiencia. El *Discurso acerca de los cuerpos flotantes* es, en realidad, una defensa y una ilustración de las conclusiones de Arquímedes con ayuda del principio de las velocidades virtuales de Aristóteles. El gran logro de Galileo descansa en esta combinación afortunada de dos grandes tradiciones: el enfoque estático de Arquímedes y el enfoque dinámico del seudoaristotélico *De Mechanica*.

Vale la pena destacar que en todos lós pasajes que marcan un significativo avance científico, Galileo no gana una victoria contra sus adversarios, quienes ni siquiera comprenden lo más básico, sino contra posiciones que él mismo había asumido sin cuestionar. El debate sobre la hidrostática es la ocasión y no el instrumento de progreso: proporciona a Galileo el desafío que necesita para superar con la razón sus propias contradicciones, que sus oponentes ni siquiera perciben.[17]

En la segunda edición del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, Galileo intenta aplicar el principio de las velocidades virtuales a la paradoja hidrostática. Utiliza un diagrama (figura 3) para ilustrar que el nivel del agua en dos vasos comunicantes es el mismo, independientemente de sus tamaños. Explica esto comentando el hecho de que cuando el agua del tubo grueso baja a *QO*, el agua del más estrecho sube hasta la altura de *AB*: .

> La subida *LB* es mayor que la caida *GQ* en la medida en que el ancho del vaso *GD* excede el ancho del tubo *LC*, que es, en suma, el exceso del agua *GO* por encima del agua *LC*. Pero puesto que el momento de la velocidad del movimiento de un cuerpo compensa el momento del peso en el otro,

17. Vincenzo di Grazia descarta sin motivo las demostraciones matemáticas de Galileo: «Debería considerar ahora cada prueba y cada proposición; pero puesto que todas sus demostraciones descansan sobre principios falsos, he decidido renunciar a este penoso trabajo.» (*Considerazioni sopra il discorso di Galileo Galilei* [Florencia, 1613], *ibid.*, p. 388.)

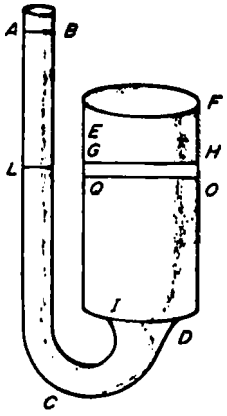


FIGURA 3

> ¿cómo nos puede asombrar que la subida rápida de la pequeña cantidad de agua *CL* resista el lentísimo descenso de la gran cantidad *GO*?

El modelo interpretativo es nuevamente la palanca:

> Lo que pasa en este caso es exactamente lo que pasa en la romana cuando un peso de dos libras equilibra otro de doscientas, puesto que recorre, en el mismo período de tiempo, un espacio cien veces mayor.[18]

Galileo confiaba en que esta prueba disipara el error de aquellos ingenieros que creían, siguiendo los pasos de Aristóteles, que un barco flota con mayor facilidad en aguas profundas. Galileo no perdía nunca la oportunidad de enseñar a los aristotélicos cómo usar sus propios principios; pero en este caso podemos preguntarnos si se justifica su aplicación del principio de las velocidades virtuales a la paradoja hidrostática. Su terminología es, cuando menos, imprecisa. Los desplazamientos de las columnas de agua son inversamente proporcionales a las áreas de sus secciones transversales y no al ancho del tubo. Y lo que es más importante: se puede argumentar que la paradoja hidrostática y el equilibrio de las máquinas simples no son casos idénticos. En el líquido de los vasos comunicantes, cualquier alteración del nivel común produce una elevación del centro de gravedad; en el caso representado por nuestro diagrama, el centro de gravedad del líquido desplazado de *GH* a *QO* se eleva hasta la mitad del camino entre *AB* y el nivel inicial en *L*, y se puede considerar que el líquido restante no se ha movido.[19]

18. Galileo, *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, *ibid.*, p. 78.
19. Ver Ernst Mach, *The Science of Mechanics*, traducción de Thomas J. McCormack,

El rol de la forma

Después de reivindicar la doctrina de Arquímedes, Galileo se dedicó al problema que originó el debate sobre la hidrostática: el rol desempeñado por la forma en la flotación y hundimiento de los cuerpos.

Colombo había utilizado una bola y una delgada tabla, ambas de ébano, para demostrar que la forma es la causa principal de la flotación de los cuerpos más pesados que el agua. Galileo perfecciona el experimento utilizando cera, material que se puede moldear en formas diferentes. Una bola de cera se vuelve justamente pesada para hundirse con sólo añadirle unas pocas limaduras de plomo; y si se moldea en formas diferentes, igualmente se hunde. Si se quitan las limaduras de plomo, la cera, cualquiera sea su forma, aflora a la superficie. Por lo tanto, ni la flotación ni el hundimiento dependen de la forma.

Para los standards modernos, este experimento parece bastante convincente, pero debemos recordar que Galileo argumenta contra los exponentes del escolasticismo tardío, quienes tenían razones para pensar de modo diferente. Los aristotélicos consideraban que la realidad era bipolar, e intentaban explicar los objetos físicos como conjuntos de acto y potencia, de materia y forma, y de substancia y accidente. En este marco de referencia, la forma es la realidad del cuerpo físico; configura la materia y forma con ella la substancia o entidad corpórea. La forma determina a la materia, a la que imparte su existencia; pero a su vez está determinada por la materia, sin la cual no puede subsistir. Esto se expresa habitualmente diciendo que materia y forma son co-principios de un ser. Cualesquiera sean los méritos filosóficos de este enfoque, su interés para la ciencia experimental, en términos de orientación, es nulo; porque ni la forma ni la materia son discernibles físicamente (es decir, experimentalmente). Forman parte de la estructura ontológica, que la ciencia presupone pero no investiga. Hasta el siglo XVII no se trazó esta distinción y todos los interrogantes quedaban enmarcados en ese contexto. Cuando las respuestas no lograban alcanzar el nivel ontológico, erraban por su limbo, una tierra de nadie donde la ciencia, tal como la conocemos, comenzaba a afirmar sus derechos.

El interrogante natural que surgía en esta perspectiva filosófica era si la forma (o la forma accidental) podía existir sin su materia correspondiente. Cada síntesis de materia y forma se consideraba una entidad dis-

---

6.ª edición (ed. Open Court Classics, La Salle, Illinois, 1960), p. 111. Stevin estudiaba la paradoja hidrostática en términos estrictamente arquimedianos en sus *Elements of Hydrostatics* (*The Principal Works of Simon Stevin*, ed. E. J. Dijksterhuis, 2 volúmenes en 3 [Swets and Zeitliner, Amsterdam], 1955, n.º 1, pp. 417-418). Pascal fue el primero que usó el principal de los desplazamientos virtuales de modo verdaderamente satisfactorio. Ver sus *Traités de l'équilibre des liqueurs et de la pensanteur de l'air*, en *Oeuvres Complètes* (ed. Bibliothèque de la Pléiade, Paris, 1962), pp. 412-420.

tinta y autónoma, y se suponía que la forma podía producir sus efectos naturales sólo cuando se unía a un material apropiado. Decir, por ejemplo, que un borde afilado tiene una mayor capacidad de cortar que otro romo, es cierto si, y sólo si, el borde afilado se encuentra en un material apropiado, como el acero. Si el material es la cera, un borde afilado no es más incisivo que uno romo porque la «forma» está en una «materia» inadecuada. Como Galileo no estudiaba el problema dentro de estos términos de referencia, sus adversarios creían que se solazaba con un razonamiento matemático abstracto y que se refería a formas «platónicas» incorpóreas. Consideraban inadecuado, para los fines de la experimentación, cualquier material al que no se le pudiera dar una forma capaz de superar la resistencia del agua. Argüían que un material más liviano que el agua no podría nunca revelar el efecto natural de la forma y sería, por lo tanto, tan inadecuado como la cera para probar que un borde afilado corta más que uno romo. Por otra parte, aceptaban el ébano, que es más pesado que el agua; y se podía demostrar claramente que una lámina delgada de ébano flota mientras que una bola se hunde. Galileo invita a sus oponentes a dar un paso atrás y a examinar por segunda vez, y bien, la lámina: ésta no sólo toca la superficie del agua sino que la deprime. Esto, sugiere, indica la solución correcta: la placa o lámina de ébano se hunde hasta una profundidad tal que el volumen de agua equivalente a los volúmenes combinados de la lámina y la depresión pesan tanto como la lámina misma. Por ejemplo, según esta teoría, la placa *ABCD* del diagrama (figura 4) flota porque el volumen de agua equivalente a los volúmenes combinados *NADM* y *ABCD* pesan tanto como la placa *ABCD*. Esto es una simple aplicación del teorema que Galileo había deducido previamente con la ayuda del concepto de momento. Una consecuencia adicional es que cualquier sólido, cualquiera sea su gravedad específica, puede flotar si entre la altura de la depresión que causa y el espesor del sólido la razón es la misma que entre su peso y el de un volumen equivalente de agua. Galileo ofrece los siguientes ejemplos: el oro, que es veinte veces más pesado que el agua, deprimirá la superficie del agua hasta una profundidad de 19 veces su espesor; y el estaño, que pesa ocho veces más que el agua, la deprimirá hasta una profundidad de siete veces su espesor. Afirma incluso que con cualquier substancia sólida, se puede construir una pirámide o un cono, que floten sin mojar más que su base. Se puede resumir su demostración de la siguiente manera:

Digamos que la altura del diquecillo *(arginetti)* es *BD*, y el diámetro de la pirámide es *BC*, en ángulo recto con *DB* (figura 5).

Si

$$\frac{\text{g. e. de la pirámide } ABC}{\text{g. e. del agua}} = \frac{\text{altura del diquecillo}}{1/3 \text{ altura de } BE}$$

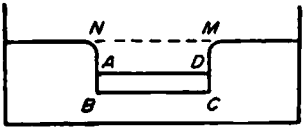


FIGURA 4

Prueba de que la pirámide *ABC* flotará:

$$\text{cilindro } EC = 3 \text{ pirámides } ABC$$

y

$$\frac{\text{cilindro } CE}{\text{pir. } ABC} = \frac{BE}{1/3\ BE}$$

Por lo tanto

$$\frac{\text{cilindro } DC}{\text{pir. } ABC} = \frac{DB}{1/3\ BE}$$

pero

$$\frac{DB}{1/3\ BE} = \frac{\text{g. e. de la pir. } ABC}{\text{g. e. del agua}}$$

Por lo tanto

$$\frac{\text{vol. } DC}{\text{vol. } ABC} = \frac{\text{g. e. de } ABC}{\text{g. e. del agua}}$$

y por el lema conocido: los sólidos cuyos volúmenes son inversamente proporcionales a sus gravedades específicas son iguales en peso, tenemos que la pirámide *ABC* pesa tanto como un volumen de agua igual al volumen *DC*. Pero el agua que la pirámide *BAC* expulsa de su lugar es precisamente tanta como la que habría en *DC* y por lo tanto igual al peso de la pirámide que la desplaza. Por lo tanto, se establece el equilibrio y *ABC* no se hundirá.

Es evidente que Galileo se permite unas vacaciones matemáticas. Después de establecer un principio, extrae todas las conclusiones lógicas posibles, sin preocuparse en absoluto por los problemas prácticos de la

aplicación física. Esto no es porque los experimentos sean difíciles, fatigosos o simplemente expuestos a interpretaciones erróneas. La razón real es que Galileo está convencido de que una vez que se ha descubierto la verdadera causa de un fenómeno particular, se pueden predecir los resultados de los experimentos antes de ejecutarlos.

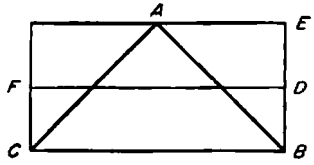


FIGURA 5

> Ahora que hemos encontrado la verdadera causa de la flotación de esos cuerpos, que por ser más pesados que el agua, de otro modo se hundirían hasta el fondo, me parece que, para el conocimiento claro e integro de esta materia, deberíamos proceder a descubrir sus propiedades particulares por medio de demostraciones.[20]

Todo esto es excelente geometría, pero ¿es buena física? La explicación de Galileo presupone que el agua no ofrece resistencia a cuerpos de variadas formas, y rechaza categóricamente lo que a oídos modernos suena como una descripción no técnica de la tensión superficial: «Quienes atribuían la causa de la flotación a la resistencia del agua a ser dividida, como principio pasivo, y a la anchura de la forma como principio eficiente, estaban muy lejos de la verdad.»[21] Fue durante el proceso de elaboración de las consecuencias de esta negativa a admitir la resistencia del agua cuando advirtió la necesidad de postular la existencia de los átomos; a este problema nos volvemos ahora.

III. LA HIPÓTESIS ATÓMICA

Es bien sabido que, en *El Ensayador*, Galileo explica el fenómeno del calor por el movimiento de los átomos de fuego. El origen de su teoría ha recibido poca atención debido, en su mayor parte, al olvido general del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, que plantea por primera vez la constitución atómica de la materia en relación con dos elementos: el agua y el fuego.

20. Galileo, *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, *Opere di Galileo*, Vol. IV, pp. 108-109.
21. *Ibid.*, p. 117.

Como hemos visto, Galileo se enorgullecía de resolver todos los problemas de la hidrostática con sólo apelar a la mayor o menor gravedad específica del sólido en relación al medio. Descartaba resueltamente toda otra explicación subsidiaria, como la forma del cuerpo o la resistencia del medio. Desechaba la referencia de Colombo a la continuidad, la tenacidad o la viscosidad del agua como una inútil multiplicación de accidentes, y sugería que el agua es un cuerpo discontinuo compuesto de átomos. Se debe entender el movimiento a través del agua como una analogía de abrirse paso a codazos entre la multitud o introducir un palo en un montón de arena. En ningún caso se rompe nada; simplemente se separa lo que ya está dividido.

El fuego proporciona también una prueba de la constitución atómica de la materia. La base del análisis es el pasaje de Aristóteles en *De Coelo*, donde se critica a Demócrito por asegurar que las placas pesadas pero anchas se mantienen a flote por las partículas de calor que se elevan del agua mientras que las placas estrechas se hunden porque sólo se le oponen unas pocas de esas partículas. Aristóteles argumenta que, si esto fuera cierto, los objetos pesados flotarían más fácilmente en el aire que en el agua. Galileo objeta que esta crítica es errónea: los cuerpos pesan más en el aire que en el agua, y no hay razón para creer que los átomos de fuego se mueven más rápidamente en el aire. Galileo utiliza esto como una oportunidad para denunciar lo que considera simple nominalismo aristotélico, porque Demócrito «no contento con meros nombres, trataba de determinar más particularmente qué eran el peso y la levedad».[22] Los aristotélicos se contentaban con volver a plantear los efectos en los términos de los poderes desconocidos que los producían. Ignoraban la importancia de la predicción precisa que da sentido a la verificación experimental.

Galileo sugiere que la teoría de Demócrito sea sometida a la siguiente prueba empírica: una lámina delgada y ancha, ligeramente más densa que el agua, se coloca en el fondo de un recipiente lleno de agua. Si los átomos de fuego son capaces de sostenerla en la superficie, podrán sin duda elevarla desde el fondo. Como no ocurre así, la implicación es que o los átomos de fuego no existen o son demasiado débiles para elevar una lámina delgada de un sólido más denso que el agua. Galileo cree que, en el caso del agua fría, la segunda alternativa es cierta. Sin embargo, cuando el agua se calienta, los átomos de fuego suben desde las brasas incandescentes, atraviesan el cristal y empujan la lámina a la superficie. Pero esto ocurre sólo en el caso de las láminas ligeras, y él concluye que los átomos de fuego no son en sí suficientes para explicar la flotación de los cuerpos.

22. *Ibid.*, p. 133.

Pocos meses después de la publicación del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, Galileo leía y comentaba las *Consideraciones* del Accademico Incognito. Una extensa apostilla revela que dedicaba aún considerable atención a su teoría atómica aunque el Accademico Incognito no la había desafiado directamente. Intrigado por el proceso de la evaporación y la ebullición, advirtió de pronto que los granos de arena, en un medio líquido, terminan por unirse y forman una masa terrosa bastante pesada para hundirse. Los átomos de fuego, sugiere, se unen de modo similar para salir del agua y escapar al aire. Los átomos que no se unen ascienden también a la superficie; pero, al intentar alcanzar el aire, «el agua que se adhiere retiene una gran cantidad, del mismo modo que, al caer a través del aire, muchos corpúsculos se detienen cuando llegan a la superficie del agua debido a la adherencia del aire».[23] Los corpúsculos que flotan en la superficie, por lo tanto, no son detenidos por el agua sino retenidos por el aire; el agua puede obstaculizar el escape de los cuerpos que se elevan en ella, pero es incapaz de ofrecer resistencia a la penetración de los objetos que vienen del exterior. No se puede evitar la sonrisa ante las acrobacias mentales a las que está dispuesto a entregarse Galileo para no admitir la existencia de la tensión superficial.

El Accademico Incognito no logró atacar los ardientes átomos de Galileo, pero Giorgio Coresio no perdió la oportunidad de lanzar una andanada de argumentos peripatéticos. Expuso no menos de veinticinco objeciones contra el atomismo de Galileo; y Benedetto Castelli, que recogió el guante por su maestro, respondió con una descarga de dieciocho refutaciones. Galileo rescató la discusión científica del humo de la retórica, y limitó su crítica a dos puntos. En primer lugar, sostiene que Coresio se equivoca al suponer que los átomos son indivisibles dado que «los átomos no se llaman asi porque no sean extensos *(quanti)*, sino porque, al ser los corpúsculos más pequeños, no hay otros más pequeños en que puedan dividirse». En segundo lugar, ataca a Coresio por suponer que el agua puede extinguir los átomos de fuego. «¿Cómo podría calentarse el agua», pregunta, «si el fuego que contiene se extinguiera?»[24] Galileo no quería saber nada con la idea de que el agua adquiere calor como una propiedad accidental, teoría propia de la interpretación cualitativa de la naturaleza contra la que lucha persistentemente. A su modo de ver, el agua caliente sólo puede producirse por la presencia de las partículas de fuego.

Dos años más tarde, Galileo vuelve al tema del atomismo en su réplica a Colombo, a quien proporciona «una muestra de su método de filosofar». El método consiste en llenar de agua una botella de cuello largo y estrecho hasta una marca hecha en la mitad, y colocarla sobre un

23. Apostilla a *Considerazioni... da Accademico Incognito, ibid.*, p. 195.
24. Benedetto Castelli, *Errori di Giorgio Coresio, ibid.*, pp. 281-282, apostillas 23 y 26.

fuego de carbón. Galileo destaca que el agua sube por el cuello mucho antes de alcanzar el punto de ebullición.

> Si quiere pues usted ver sensatamente de dónde deriva este incremento, observe con diligencia y verá que a medida que se multiplican los átomos de fuego en el agua muchos se reúnen y forman pequeños glóbulos que suben en gran cantidad y se escapan de la superficie. Cuanto mayor es su número, más agua sube por el cuello de la botella, y si mantiene la botella sobre las brasas durante bastante tiempo, verá muchos miles de glóbulos que suben y escapan. *Estos, Sig. Colombo, no son, como usted cree, vapores generados por algunas partes del agua que cambian y se transmutan en vapor debido al calor del fuego.* Esto es obvio, porque si remueve usted los carbones cuando ya se han ido varios miles de glóbulos, y espera hasta que se marchen también los que estaban más dispersos y eran, por esta razón, invisibles, comprobará que el agua desciende lentamente hasta que al final queda, sin perder ni siquiera una gota, en el mismo nivel marcado en el cuello de la botella. Si repite usted mil veces la operación, verá millones de esas pequeñas esferas de fuego atravesar el agua sin que el agua descienda el espesor de un cabello. A fin de estar más seguro de los resultados, después de colocar el agua en la botella, puede sellarla con cristal. Podrá entonces dejar la botella sobre las brasas durante meses y verá siempre que los glóbulos suben, pasan al otro lado y penetran en el aire, y no se consumirá nunca, ni siquiera en cien años, una sola gota del agua encerrada.

Una analogía ayuda a definir este punto: del mismo modo que el viento levanta motas de polvo y las arroja lejos, los átomos de fuego atraviesan el cristal, capturan los átomos de agua y los elevan en el aire. Las partículas de polvo no se convierten en aire o vapor; del mismo modo, los átomos de agua no pierden su identidad y se pueden recuperar mediante la condensación. La velocidad y el momento con que los átomos de fuego atraviesan el cristal se atribuyen a su compresión en el carbón. Cuando chocan contra una lámina ligera, se unen debajo de ella y forman pequeños glóbulos, «fácilmente discernibles en la forma de algo parecido al rocío», y empujan la lámina hacia arriba.

> Esta, Sig. Colombo, no es sino una muestra del método de filosofar del Sig. Galileo. Creo que es mucho más seguro que introducir meros nombres de generaciones, transmutaciones, alteraciones, u otras operaciones, presentados y a menudo utilizados cuando alguien no sabe cómo enfrentarse con problemas que no comprende.[25]

Galileo es un poco injusto con sus adversarios, quienes no tienen sus ojos de lince para *ver* realmente los átomos de fuego burbujeando hacia la superficie. Todo lo que Colombo era capaz de percibir en esos glóbu-

25. Benedetto Castelli (y Galileo), *Risposta alle apposizioni* (Florencia, 1615), *ibid.*, p. 654-656, cursivas del autor.

los como el rocío era vapor de agua. Esto ilustra cómo los filósofos naturales recogen aquellos elementos que sus teorías les conducen a esperar y rara vez buscan algo más. Galileo observaba que el agua estaba más caliente en la superficie que en el fondo del recipiente en el que se había calentado. No comprendía, sin embargo, que se establecía una circulación en el recipiente, como observaba Colombo. La razón es clara: Galileo tendía a suponer que el agua debía estar más caliente en la superficie porque creía que allí quedaba retenida una gran cantidad de átomos de fuego, mientras que, en su hipótesis, nada sugería que giraran en círculo. Colombo, por el contrario, buscaba esa circulación: su descripción de la ebullición implicaba que el agua, naturalmente fría, se ponía ella misma en movimiento y circulaba para enfriarse y evitar la corrupción por el calor.

IV. El problema del método

El principio de autoridad

Lo que asombra (y generalmente molesta) a los lectores modernos de literatura científica de los siglos XVI y XVII es la apelación constante a los escritos de los grandes hombres del pasado. Allí donde el sabio moderno introduce pruebas experimentales para demostrar un punto, el erudito medieval o del Renacimiento cita un pasaje relevante de algún filósofo griego. Para comprender el sentido de gran parte de lo dicho y argumentado en el debate sobre los cuerpos flotantes, debemos recordar que ése es el clima intelectual en el que Galileo vivía. Antes del siglo XVI, el hombre no esperaba un carácter progresivo del conocimiento humano. Por supuesto, conocía ciertos desarrollos históricos de la ciencia; pero creía que estos desarrollos tenían cierto punto máximo fijo. Había un tope para el logro humano, y se había alcanzado con la ciencia griega; a ella –como decía Giorgio Coresio– podían recurrir los hombres que necesitaban guía:

> Una de las maravillas de la naturaleza es que ha creado un maestro supremo en cada ciencia y en cada arte. La naturaleza aplica por separado sus mayores enseñanzas a algunas personas a quienes demuestra la belleza de sus ideas, y a quienes luego señala para que otros sepan qué normas seguir.[26]

26. Giorgio Coresio, *Operetta intorno al galleggiare de' corpi solidi* (Florencia, 1612), *ibid.*, Vol. IV, p. 218. Antiguas historias habían adquirido, por larga tradición, tal prestigio en la imaginación común que no se distinguían de la realidad. Un ejemplo es el texto de Séneca acerca de un lago en que flotaban los ladrillos. Buonamico, profesor de Galileo en Pisa, lo citó para demostrar que Arquímedes estaba equivocado en el terreno experimental; y Co-

La convicción prevaleciente de la época era que o no se podían resolver los problemas por estar más allá de la comprensión humana, o ya se habían resuelto; y que las respuestas, al menos a grandes rasgos, se encontraban en los grandes trabajos del pasado. Esto explica por qué el aspecto deductivo de la ciencia desempeñó una parte tan importante en el pensamiento medieval. Explica también por qué Aristóteles alcanzó tan gran autoridad en la Edad Media y por qué el Renacimiento pudo ser un retorno a la edad de oro de la cultura griega en general. Los hombres discutían a veces qué autoridad constituía el tribunal supremo de apelación; pero no cuestionaban la existencia de esa autoridad. Tanto el escolasticismo como el humanismo, a pesar de sus diferencias fundamentales, evocaban la antigüedad griega. Estaban de acuerdo en que el primer objetivo de la investigación académica era sacar conclusiones de los principios establecidos por sus predecesores. Se podía extender o ignorar el conocimiento, pero nunca revisarlo drásticamente.

En Italia, a comienzos del siglo XVII, dos grupos de estudiosos concordaban acerca del principio de autoridad pero seguían a diferentes maestros. Por una parte, los aristotélicos, que ocupaban las principales cátedras y constituían el *establishment* académico; por otra, un pequeño grupo de platónicos disidentes de diversos matices y tendencias.[27] Los matemáticos –que seguían a Euclides y a Arquímedes– y los médicos –que leían a Galeno– formaban grupos independientes. Cuando intervenían en debates filosóficos, se suponía que se adherían a uno de los dos campos; se consideraba a un no platónico como discípulo de Aristóteles, y se esperaba que un antiaristotélico defendiera las doctrinas de Platón. Galileo se encontró pronto en dificultades debido a estas etiquetas automáticas. Los profesores de filosofía podían respetarlo como un experto en geometría (por el valor de la materia), pero jamás se les habría ocurrido que pudiera ser un genio creativo o un invocador brillante en filosofía. Por el contrario, pensaban que revivía antiguallas y se batía por ideas obsoletas que Aristóteles había refutado mucho antes, como

---

resio, Colombo y di Grazia lo repitieron. Galileo no se dejó engañar y lo explicó como el resultado natural de un proceso de embellecimiento: «Quizás se trataba de unas aguas levemente más pesadas que la ordinaria, en las que cuerpos algo más pesados que los que flotan en nuestra agua no se hundían. La fama, como de costumbre, exageró el hecho de tal modo que lo hizo fabuloso. La señal de que esto puede haber sucedido se encuentra en un poeta moderno, que habla de ese lago y dice que en él no sólo flotan las piedras sino también el hierro, tratando de hacer el relato aún más maravilloso» (*ibid.*, p. 787). Otro ejemplo es la prueba de Colombo de que los diamantes son porosos aunque no lo parecen: «Si los diamantes no fueran porosos, serían inodoros. Los naturalistas, sin embargo, escriben que un perro o un animal similar los descubre por su olor» (*ibid.*, p. 346).

27. Hacia fines del siglo XVI, hacía tiempo que había concluido el apogeo de la moda platónica: un patricio veneciano escribía a su amigo florentino, en 1589, que era deseable *introducir* el estudio de Platón en Padua (carta de Benedetto Zorzi a Baccio Valori, 2 de diciembre de 1589), *ibid.*, Vol. X, p. 42.

debía saber cualquiera que hubiese leído el texto corriente de Buonamico sobre el movimiento. Cuando querían ser amables, decían que Galileo sólo trataba de provocar discusiones. «Creo», dice Coresio, «que Galileo publicó su *Discurso* para suscitar la discusión entre los *letterati*, y no para plantear una opinión distinta». Colombo agrega que Galileo revive varias opiniones de los antiguos como un mero ejercicio intelectual.[28] Era concebible que pudiera ser útil despertar el interés sobre conceptos anticuados si eso conducía a una mejor apreciación de la verdad contenida en la posición peripatética; pero hubiera sido perjudicial que estudiantes formados e informados a medias los tomaran en serio. Los académicos más ancianos consideraban que su obligación era proteger a los jóvenes de ideas que podían parecer modernas pero que, en realidad, estaban muy lejos de ser nuevas. Arturo Pannochieschi de' Conti d'Elci, inspector de la Universidad de Pisa, pidió a la Gran Duquesa que prestara su apoyo al filósofo a quien el mismo Alejandro el Grande había concedido su ilustre protección. Si Aristóteles, a pesar de su grandeza, «no fuera a veces apoyado y reforzado por el favor de nuevos Alejandros, perdería o disminuiría en gran medida su popularidad. La mayoría de los hombres, por la impaciencia de la juventud, la envidia, o el aburrimiento de continuar con la misma doctrina, se inclinaría a cosas nuevas, aunque menos seguras, siempre que fueran aceptadas en la corte».[29]

Un buen erudito no sólo busca protección política para la doctrina de Aristóteles, sino que se preocupa por defender en todo momento su reputación. Esto nos puede parecer extraño, pero es el resultado lógico de una concepción monolítica de la verdad. Si la verdad es una y única, no se puede encontrar en sistemas de filosofía incompatibles entre sí ni se puede fragmentar y recoger en partes y en añicos. Si Aristóteles estaba en lo cierto en los temas básicos, todo indicaba que había resuelto correctamente los secundarios. La tarea del filósofo era descubrir la unidad real debajo de las contradicciones aparentes. El debate sobre los cuerpos flotantes proporciona dos sorprendentes ejemplos de este procedimiento. Así, cuando Galileo censuró a Aristóteles por su afirmación de que una aguja no podía flotar en el agua, los eruditos escolásticos replicaron inmediatamente que Aristóteles se refería a una aguja colocada verticalmente en el agua, o que pensaba en una aguja grande y pesada. Sostener, como Galileo tuvo la impudencia de hacer, que Aristóteles jamás había hecho el experimento, era ridículo. *Debía* haberlo realizado puesto que «es fácil de hacer para cualquiera» y «no podía ser muy difícil para Aristóteles que quería observar una cantidad infinita de experimentos difíciles».[30]

28. Coresio, *Operetta, ibid.*, Vol. IV, p. 204; Colombo, *Discorso Apologetico, ibid.*, p. 317.

29. *Considerazioni... da Accademico Incognito, ibid.*, p. 147.

30. Coresio, *Operetta, ibid.*, p. 235.

La reacción de Giorgio Coresio ante la crítica de Aristóteles porque no había comprendido las proporciones matemáticas proporciona la segunda ilustración de esta actitud: «¿Quién creerá», escribe, «que un hombre con esa doctrina tan eminente no estudiaba geometría, que en ese momento estudiaban los niños, así como ahora aprenden las letras del alfabeto?». Tratar de enseñar a Aristóteles los principios de la filosofía es intentar llevar luz al sol.[31] Colombo compadece a Galileo:

> Me parece que Galileo se ha vuelto equivocadamente un antiperipatético. En este asunto particular, deseo ser un antigalileano, en gratitud a Aristóteles, ese gran príncipe de tantas academias, director de tantas escuelas, objeto de tantos poemas, tema de tantos historiadores. Leyó más libros que días vivió, escribió más trabajos que años cumplió; un nuevo y divino Briareo que con cien manos y cien plumas parecía escribir cien trabajos, y de quien, finalmente, han dicho famosos escritores que *natura locuta est ex ore illius.*[32]

El lenguaje de la naturaleza y el lenguaje de la ciencia

«La naturaleza habla a través de su boca.» Para los círculos oficiales académicos, el acercamiento a la ciencia no ofrecía problemas. Aristóteles había marcado a fuego las huellas, y allí estaban para que todos las siguieran. «Concluiremos, por lo tanto», dice Coresio, «que quien no quiera caminar en la oscuridad debe consultar a Aristóteles, excelente intérprete de la naturaleza».[33]

Esta actitud mental irritaba a Galileo, para quien intérprete de la naturaleza no era Aristóteles, Platón, Demócrito, o ninguno de los antiguos, sino la naturaleza que hablaba por sí misma. Mientras que los aristotélicos trataban de resolver un problema como si fuera una cuestión legal, apelando a la autoridad, Galileo acudía directamente al tribunal de la naturaleza, aunque con Arquímedes como abogado. Sus adversarios no comprendían el carácter de su empresa. Si rechazaba los argumentos peripatéticos, suponían que era porque no los comprendía o porque era platónico, o quizás ambas cosas. Cuando Galileo declaraba que sólo apoyaba a Platón en un punto, es decir, en la ausencia de levedad positiva, veían en esto otro ejemplo más de su falta de sofisticación filosófica.[34] Le aconsejaban estudiar los argumentos de Aristóteles «en

31. *Ibid.*, p. 240.
32. Colombo, *Discorso Apologetico, ibid.*, pp. 317-318.
33. Coresio, *Operetta, ibid.*, p. 238.
34. El platonismo de Galileo en el debate sobre los cuerpos flotantes se refería y limitaba explícitamente a una defensa del rechazo platónico de la levedad positiva. Castelli deseaba explicar a Coresio que «Galileo no prometía defender las creencias de Platón, Anaximandro, y Demócrito (si es que las tenían) en un universo infinito, sino sólo en cuanto ellos negaban

vez de desecharlos con orgullo, como si fuera suficiente decir: "Lo dijo Pitágoras".» Benedetto Castelli, el discípulo favorito de Galileo, replica inteligentemente:

> Galileo no intenta ir contra la filosofía de Aristóteles ni revivir viejas ideas, sino decir la verdad. Si ocurre que, con el fin de descubrirla, va contra Aristóteles o revive viejas ideas, no lo hace por maldad o por capricho sino porque su deseo es conocer la verdad. Él pone esto, con acierto, por encima de todo lo demás, así como, en los problemas naturales, pone la naturaleza por encima de la autoridad de cualquier autor famoso, como debe hacer cualquiera que desee filosofar correctamente.[35]

Una vez aceptado que la naturaleza habla por sí misma y no necesariamente a través de Aristóteles, ¿cómo se puede saber qué dice la naturaleza? Galileo querría que sus lectores hicieran el descubrimiento que un creciente número de jóvenes nobles hacía en Florencia: la geometría ofrece alas: sin su ayuda nadie puede elevarse por encima del suelo. Castelli se maravillaba de que un hombre que no supiera geometría tuviera la audacia de criticar la lógica de Galileo. El mismo Galileo declaraba que escribía para quienes comprendían las matemáticas, y que era completamente consciente de que más del ochenta por ciento de quienes leyeran su libro serían incapaces de seguir sus argumentos.[36] Lamentaba el hecho de que mientras la geometría daba al hombre la posibilidad de observar la naturaleza, los eruditos escolásticos se vendaran los ojos y siguieran a Aristóteles.

En realidad, ¿qué pensaban los aristotélicos de esta nueva visión matemática? En pocas palabras, estaban persuadidos de que era completa-

---

en particular que la levedad era una cualidad real de los cuerpos naturales» (*ibid.*, p. 264). Galileo mismo no se refería generalmente a Platón de modo individual sino más bien como miembro de un grupo: «Platón y los antiguos» (*ibid.*, pp. 85 y 194). «Platón y los otros» (*ibid.*, p. 670). Negaba enfáticamente su adhesión a la filosofía platónica de las formas: «dico che le figure, come semplici figure, non solamente non operano nelle cose naturali, ma nè anche si ritrovanno dalla sustanza corporea separate, nè io le ho mai proposte denudate della materia sensibile» (*ibid.*, p. 90). El debate sobre el platonismo de Galileo procede en gran medida de la multiplicidad de «platonismos», que los historiadores de la ciencia no siempre distinguen. Incluso el interesante «Galileo and Plato» de Alexandre Koyré, *The Journal of the History of Ideas*, n.º 4 (1943), pp. 400-428, adolece de esta ambigüedad. La distinción de Ernst Cassirer entre el platonismo *escéptico, místico, cristiano* o *romántico* es valiosa pero incompleta («Galileo's Platonism» en *Studies and Essays... in Homage to George Sarton*, ed. M. F. Ashley Montagu [1947; reeditado por Kraus Reprint, New York, 1969], pp. 279-297). Existen también un platonismo *matemático*, que puede ser *aritmológico o geométrico*, un platonismo *literario* y un platonismo que es simplemente un *manto* usado por quienes estaban en contra del *establishment*. Nadie puede dudar de la influencia literaria de los *Diálogos* de Platón sobre el estilo de Galileo; pero el alcance de su influencia filosófica es un tema en discusión, al que volveremos en los capítulos 5 y 6.

35. Castelli, *Risposta alle opposizioni*, *Opere di Galileo*, Vol. IV, pp. 466-467.

36. *Ibid.*, p. 443. El punto de vista popular de que Galileo apelaba a los profanos saltando por encima de la cabeza de los eruditos no soporta el menor análisis.

mente inadecuada para cualquier indagación seria sobre la naturaleza. El Accademico Incognito lo decía claramente: «las proposiciones y las pruebas de las matemáticas no logran demostrar la fuerza y las causas rèales de las operaciones de la naturaleza.» Las matemáticas hacían abstracción de las propiedades concretas de los cuerpos físicos. Quizás fuera un juego interesante, una forma superior de gimnasia mental, pero no revelaba nada acerca del mundo real. Vincenzio di Grazia compartía la misma convicción:

> Antes de considerar las demostraciones de Galileo, parece necesario demostrar qué lejos de la verdad están quienes desean verificar los hechos naturales mediante el razonamiento matemático, entre quienes, si no me equivoco, está Galileo. Todas las ciencias y todas las artes tienen sus propios principios y causas, a través de los cuales demuestran las propiedades especiales de su objeto propio. Se sigue que no estamos autorizados a usar los principios de una ciencia para demostrar las propiedades de otra. Por lo tanto, cualquiera que crea que puede demostrar propiedades naturales con argumentos matemáticos está lisa y llanamente loco, ya que las dos ciencias son muy diferentes. El científico natural estudia los cuerpos naturales cuyo movimiento es su estado propio y natural; el matemático abstrae su tema de todo movimiento.[37]

Galileo había anticipado esta especie de menosprecio de las matemáticas en su borrador del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes:*

> Espero una réplica terrible de alguno de mis adversarios, y casi puedo oírle gritar en mis oídos que una cosa es referirse a algo desde el punto de vista físico y otra muy distinta desde el matemático, y que los geómetras deberían quedarse entre sus girándulas, y no enredarse en asuntos filosóficos cuyas verdades son diferentes de las verdades matemáticas. Como si la verdad pudiera ser más que una; como si la geometría de nuestro tiempo fuera un obstáculo para la adquisición de la filosofía verdadera; como si fuera imposible ser un geómetra y también un filósofo, de tal modo que debiéramos inferir, como una conclusión necesaria, que alguien que sabe geometría no puede saber física, ni tampoco razonar o estudiar físicamente materias físicas. Una conclusión no menos necia que la de cierto médico que dijo, movido por un acceso hepático, que el doctor Acquapendente, por ser un famoso anatomista y cirujano, debía contentarse con sus hierros y sus ungüentos y no entretenerse en curaciones médicas, como si el conocimiento de la cirugía se opusiera a la medicina y la destruyera.[38]

Estas citas ilustran un aspecto sorprendente de la ciencia aristotélica en el siglo XVII: la estricta división del conocimiento en compartimentos

---

37. *Considerazioni... da Accademico Incognito, ibid.*, p. 165; di Grazia, *Considerazioni, ibid.*, p. 385.
38. *Fragmenti, ibid.*, pp. 49-50.

estancos. Es importante ver exactamente lo que esto implicaba, y cómo nacía de la comprensión estática del conocimiento humano divorciado de la actividad técnica. El mundo de Colombo, di Grazia, Coresio y el Accademico Incognito era un conjunto estable de formas fijas que no se podía transformar. El hombre sólo podía introducir modificaciones accidentales, pero no cambios significativos. La palabra *ciencia*, en el siglo XX, sugiere el poder de transformar el mundo; en la época de Galileo designaba un conocimiento de los aspectos permanentes de este espectáculo transitorio. Las limitaciones impuestas a las posibilidades humanas de modificar la naturaleza explican que los filósofos hicieran una distinción rigurosa entre ciencia y tecnología. La primera era conocimiento «profundo»; la segunda, mero trabajo manual. Las matemáticas eran una forma idealizada de considerar las tres dimensiones de un cuerpo; pero no proporcionaban verdadera comprensión de la naturaleza de la extensión, ni tenían relevancia práctica. ¿Quién ha visto alguna vez un círculo perfecto, una recta sin espesor o un punto sin magnitud? Las matemáticas sólo se convirtieron en un problema para los filósofos cuando permitieron al hombre transformar la naturaleza. Sabemos que el avance de la tecnología dependió, en gran medida, del desarrollo de la geometría y de las matemáticas; y la tecnología ha revelado que la naturaleza no es conjunto estable de formas fijas sino un reino infinito de posibilidades de transformación. Esto arroja una nueva luz sobre el papel de las matemáticas en nuestro conocimiento del mundo, pero difícilmente se puede reprochar a los aristotélicos que no lo hayan previsto.

Cuando el Accademico Incognito decía que Galileo, después de establecer un reino en el cielo, quería conquistar un imperio bajo la luna, sus palabras eran más acertadas de lo que imaginaba. Galileo no solamente creía en la posibilidad de ampliar el conocimiento existente con la ayuda de las matemáticas; estaba convencido de que se podían descubrir cosas radicalmente nuevas y de que las riquezas de la naturaleza eran infinitas: «todos los hombres juntos, los que han llegado y los que llegarán al mundo, no conocen y quizás nunca conocerán más que una pequeña parte de la filosofía natural». Esto implicaba que el estudio de la naturaleza era un proceso largo y arduo, y que los científicos eran frecuentemente acosados por la inseguridad.

> Galileo admite de buena gana que puede pasar meses y años indeciso acerca de un problema de la naturaleza, y que no tiene ninguna esperanza de encontrar respuestas a una cantidad infinita de problemas. Sé que mira sin envidia a quienes se apresuran y piensan que pueden penetrar en un instante en los secretos más recónditos de la naturaleza.[39]

39. Castelli, *Risposta alle opposizioni*, *ibid.*, pp. 567 y 653.

Pero en la mente de Galileo no había ninguna duda acerca de la posibilidad de conocer algunas de las causas intrínsecas de los fenómenos naturales. Insistía repetidamente en que había encontrado la causa verdadera, única y absoluta de la flotación de los cuerpos, y Benedetto Castelli, escribiendo bajo el ojo vigilante del maestro, aseguraba que «las proposiciones demostradas por Arquímedes son eternamente válidas para los medios húmedos».[40] Galileo ridiculizaba a sus oponentes porque introducían hipótesis subsidiarias tan generales que carecían de toda relevancia empírica.

> Aristóteles jamás habría sido tan pueril, en una discusión filosófica, como para decir: «La causa de este efecto es ésta, unida a otras causas que la acompañan», sin especificar cuáles eran. Si bastara con no excluir una causa para filosofar correctamente acerca de una propiedad natural, se podría aprender toda la filosofía en cuatro palabras. Si ustedes se contentan con eso, yo podré satisfacer cualquiera de sus dudas. Por ejemplo, si me preguntan las causas de la salinidad del mar, diré, que son las manchas de la luna, junto con otros accidentes, las que producen la salinidad; con respecto a la inundación del Nilo, diré que depende del movimiento de Mercurio y de otros accidentes que contribuyen a producir este efecto.[41]

La función de los experimentos

Hemos visto cómo Galileo definía sus términos, cómo explicaba sus principios y cómo procedía deductivamente a establecer una serie de teoremas, con la ayuda del principio de las velocidades virtuales y de la palanca como modelo. Pero, ¿cómo verifica la verdad de una teoría? Una teoría errónea puede producir resultados correctos, y el mismo Galileo, en un borrador inicial del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, dedujo una conclusión verdadera de una premisa falsa. De su propio error aprendió que una respuesta correcta no garantiza necesariamente la validez de la teoría que la genera, y que los experimentos hablan con su propia y autorizada voz.

Aparentemente, para Galileo, la situación ideal era aquella en que se podía aplicar de inmediato un modelo con propiedades conocidas, como la palanca. Los principios válidos para ese modelo se aplican luego a un problema particular; las consecuencias se elaboran y confrontan con la experiencia o se someten al experimento. Si no se dispone de un modelo, se buscan analogías con acontecimientos familiares. Por ejem-

---

40. Castelli, *Errori di Giorgio Coresio, ibid.*, p. 261.

41. Castelli, *Risposta alle opposizioni, ibid.*, p. 501. «De este modo, si alguien dijera que la luna se vuelve más oscura y amoratada a causa del veneno de la cabeza o la cola del dragón que se le acerca, razonaría perfectamente, mientras no excluyera específicamente la interposición de la tierra, causa real de los eclipses lunares» (*ibid.*, p. 579).

plo, Galileo sugiere que moverse a través del agua es similar a abrirse paso a codazos en una habitación repleta de personas. Pero las analogías pueden inducir a error, como cuando Galileo compara la acción del aire sobre una lámina flotante con la fuerza de atracción de un imán.

> Quizá alguno de los caballeros que no están de acuerdo conmigo se maravillarán si afirmo que el aire próximo a la lámina de cobre o plata que está sobre el agua es capaz de sostenerla, como si yo, en cierto sentido, le atribuyese al aire una especie de virtud magnética.[42]

Galileo introduce esta analogía para afrontar una dificultad: una lámina que flota cuando está seca, se hunde cuando está humedecida regularmente con una capa delgada de agua. La implicación parecería ser que la teoría sobre los cuerpos flotantes de Galileo es incorrecta, y que intenta evitarlo atribuyendo al aire la propiedad de atraer las láminas secas y no las húmedas. Se dice que un experimento confirma este punto de vista. Se carga una bola de cera con la cantidad de limaduras de plomo justamente suficiente para que se hunda hasta el fondo de un recipiente de agua. Se sumerge un vaso, boca abajo, y se coloca sobre la bola de modo que ésta esté en contacto con el aire del vaso. Cuando el vaso se levanta lentamente, la bola lo sigue hasta la superficie y permanece flotando después que se quita el vaso. La afirmación de Galileo de que esto prueba la existencia de una fuerza de atracción en el aire encuentra unánime desaprobación. El Accademico Incognito objetaba que no podía comprender por qué el aire perdía su virtud magnética si la lámina estaba cubierta por una delgada película de agua, y Giorgio Coresio preguntaba por qué esa virtud no actuaba a distancia, como la de una piedra imán. Pero los comentarios más interesantes fueron formulados por Tolomeo Nozzolini, que aprobaba el enfoque arquimediano de Galileo, pero lo criticaba en el terreno experimental por asegurar que los diquecillos del agua no cubrían la lámina sino que retrocedían, como se ilustra en la figura 6. «Creo que puedo ver en el experimento real», escribía, «que los diquecillos se proyectan sobre la lámina en forma de semicírculos»,[43] como en la figura 6. Si era así, la demostración de Galileo de que una pirámide de cualquier material puede flotar mientras tenga húmeda sólo su base, perdía toda relación con la situación física real.

En su réplica, Galileo refutaba la versión del experimento de Nozzolini, pero aprovechaba la oportunidad de rechazar la expresión «virtud magnética». La había introducido, decía, un caballero importante que, al no comprender exactamente qué le explicaba él al Gran Duque, exclamó: «¡Entonces, atribuyes al aire una atracción magnética!» En el

42. Galileo, *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, *ibid.*, pp. 101-102.
43. Carta a Mons. Marzimedici, 22 de septiembre de 1612, *ibid.*, p. 292.

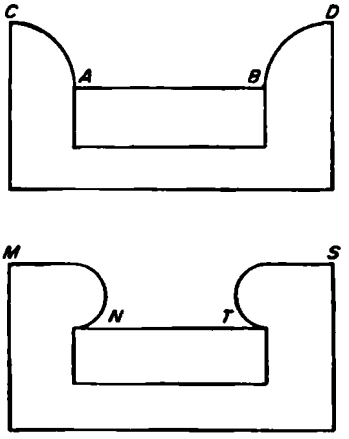


FIGURA 6

Discurso acerca de los cuerpos flotantes, se mencionaba esta idea «para informar a quienes la habían introducido que yo no la consideraba verdadera».[44] La explicación de Galileo, por lo tanto, es que un cortesano usó una comparación y que él no la ridiculizó por razones tácticas, sino que la adaptó a sus propósitos del modo expuesto en el *Discurso*. Pero la verdad era que se estaba deshaciendo de una analogía descuidada que había aceptado, no sólo para no ofender a un miembro importante de la corte, sino porque pensaba que se podía usar para explicar que retenía los diquecillos del agua. La piedra imán había fascinado siempre a Galileo y pasó varios años haciendo experimentos con magnetos. Sin embargo, se sintió cada vez más irritado por la dificultad de cuantificar y medir su fuerza. Cuando le escribió a Nozzolini, jugaba todavía con la idea de utilizar el imán como un modelo, como lo demuestra un pasaje del borrador de su carta, donde compara las partículas de agua con pequeños magnetos esféricos, inseparables pero que se pueden hacer girar uno alrededor del otro. Mediante este modelo, Galileo esperaba evitar la acusación de haber reintroducido subrepticiamente la resistencia a la división, a la que se había opuesto con tanta firmeza. Pronto comprendió, no obstante, que su distinción entre la resistencia a la división y la resistencia al movimiento alrededor de un cuerpo magnético próximo no ofrecería una solución real. Porque, ¿cómo podía hundirse un cuerpo sólido en un medio en que las partículas no pudieran separarse de las

44. Carta a Tolomeo Nozzolini, enero de 1613, *ibid.*, p. 299.

partículas inmediatas? ¡Sería como tratar de meter un palo en una caja perfectamente llena de bolitas perfectamente esféricas! Por consiguiente, Galileo abandonó la analogía magnética; su carta a Nozzolini da la impresión de que nunca la ha tenido en cuenta.

Sin embargo, Galileo no se aparta nunca de su creencia de que tenía la solución básica del problema de los cuerpos flotantes:

> La causa próxima e inmediata de la flotación es la única causa ya mencionada, es decir, el exceso del peso y de los momentos del agua por encima del peso y de los momentos de la lámina.

Lo que retiene los diquecillos le parece asunto secundario:

> No me preocupa si el hecho de que los diques de agua *(argini acquei)* no se rompen... se atribuye a un deseo de las partes de permanecer unidas, o a la sequedad de la lámina que resiste la humedad del agua, o al aire que se adhiere a la lámina. Es irrelevante para nuestro aspecto principal, para el cual es suficiente con verificar que la lámina de plomo hace una cavidad en el agua capaz de contener una cantidad de agua de igual peso que la lámina.[45]

Galileo tiene la prueba experimental de que los diquecillos existen, y cree que ha encontrado la causa inmediata que le permite predecir su altura. Qué hace que las partículas de agua se unan es otra cuestión, quizás igualmente interesante; pero él no cree que debe responder a ella. Su objetivo es una teoría coherente, y no se permite constantes distracciones por la duda de que sea susceptible de realización física.

Parecería, por lo tanto, que los experimentos no son esenciales para Galileo en el sentido de que su simple repetición mecánica pueda producir una teoría. Son importantes, en cambio, en la medida en que desempeñan un rol discriminador en la selección del conjunto de principios que se usarán como base de la interpretación física de la naturaleza. Esto significa que la construcción de hipótesis exactas es sólo el primer paso en la ciencia. El segundo es derivar de ellas conclusiones prácticas y diseñar experimentos bien elegidos para ponerlas a prueba. Una de las grandes contribuciones de Galileo al desarrollo del método científico es que reconocía con claridad la necesidad de aislar la causa verdadera mediante la creación de condiciones artificiales en las que se modifica un elemento por vez. Por ejemplo, a fin de descubrir si la forma era la causa de la flotación, destacaba que era esencial «eliminar todas las otras causas que podían producir el mismo resultado, dejando solamente la diferencia entre la forma de los cuerpos». Como el uso de diferentes materiales dificultaba la discriminación entre los efectos producidos por el

45. *Ibid.*, p. 304.

peso y los determinados por la forma, especificaba que se debía elegir un material casi tan denso como el agua para permitir que una leve diferencia en la forma provocara un cambio apreciable en la velocidad de ascenso y descenso. Revela el olfato experimental de Galileo su elección de la cera, que es maleable y puede volverse casi tan densa como el agua con unas pocas limaduras de plomo.

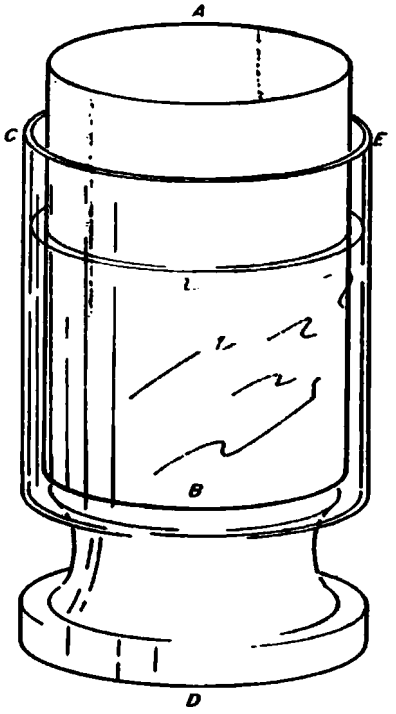


FIGURA 7

El Accademico Incognito intentó seguir estos cánones metodológicos y sugirió un experimento con el que se podía eliminar el aire de la depresión producida por el sólido que flota sin alterar el sólido ni el agua. Cubría la superficie de la lámina flotante con otra de la misma medida, pero sin tocar la lámina ni los lados.

> El aire es expulsado y, al huir, busca refugio en su propio elemento, y abandona la lámina que, no obstante, queda a salvo y flota. La forma flotante, jubilosa, grita: «¡Victoria! ¡Victoria!»[46]

Galileo se había expuesto a un ataque semejante al comparar el aire con un imán. La objeción le obligó a elaborar una solución sobre principios estrictamente hidrostáticos, y a proponer dos nuevos experimentos que describió, con creciente precisión, en apostillas a las *Consideraciones* del Accademico Incognito y, pocos meses más tarde, en su carta a Nozzolini.

El primer experimento consistía en introducir un cilindro sólido de metal en un vaso vacío hasta que estaba a cuatro dedos del fondo, en sujetarlo a un soporte sólido, y en volcar luego agua en el espacio que quedaba en el vaso. A pesar de la pequeña cantidad de agua, es tan difícil levantar el vaso como cuando está lleno de agua hasta el borde. En una nota posterior, Galileo describe el experimento más extensamente. Esta vez, el vaso *CDE* se llena de agua y se alza lentamente de modo que el peso *AB* expulsa el agua. Se encuentra que el peso del vaso permanece inalterable a lo largo de toda la operación.[47] Galileo describe el mismo experimento a Nozzolini, y añade que si se introdujera un peso en una vasija flotante de madera hasta expulsar casi completamente el agua, la vasija aún flotaría, «como el experimento mostrará claramente a cualquiera; pero, además del experimento, no falta una razón».[48] La razón, por supuesto, es el principio de Arquímedes, interpretado con la ayuda del principio de los desplazamientos virtuales. «Signore Accademico: el trozo de plomo que coloca usted entre los diquecillos expulsa el aire que hay allí, pero eso confiere a la vasija momentos iguales a los del aire expulsado.»[49]

En el segundo experimento, se llena un recipiente de cristal con suficientes municiones de plomo para que se hunda suavemente hasta el fondo de una vasija de agua. Luego se calienta ese recipiente sobre un fuego de carbón. Se sella la boca y se deja enfriar antes de colocar de nuevo el recipiente en el agua, donde flotará porque se ha eliminado el aire y no se ha introducido nada que ocupe su lugar, «como usted verá experimentalmente si abre el cilindro y siente cómo el aire se introduce en su interior con gran ímpetu».[50] En su carta a Nozzolini, Galileo sugiere una versión perfeccionada de este experimento que implica adaptar al reci-

---

46. *Considerazioni... da Accademico Incognito, ibid.*, p. 102.
47. *Ibid.*, pp. 182-183, apostilla. Vale la pena advertir que Galileo no ofrece una medición precisa. El recipiente se sostiene simplemente con la mano: «si sostienes el recipiente... verás cómo aumenta su peso».
48. Carta a Tolomeo Nazzolini, *ibid.*, p. 307.
49. Apostilla a las *Considerazioni... da Accademico Incognito, ibid.*, p. 183.
50. *Ibid.*, p. 184.

piente de cristal un tubo estrecho y largo y observar la profundidad a que se hunde. Demuestra su conocimiento de las dificultades experimentales cuando escribe que «el trozo de cera u otro material utilizado para sellar la abertura se debe colocar en el recipiente de cristal (sin cerrarlo) antes de eliminar el aire; de lo contrario, añadiremos fácilmente más peso que el del aire expulsado».[51] Se debe también dar tiempo a que el recipiente se enfríe antes de colocarlo sobre el agua para permitir que escapen las «exhalaciones ígneas». ¡Tal vez su peso podía inclinar la balanza contra Galileo!

Dos teorías rivales pretenden interpretar los fenómenos hidrostáticos. En palabras de Galileo, son «la regla del predominio de los cuatro elementos», y «la regla de Arquímedes».[52] La primera regla es científicamente irrelevante porque no nos permite predecir si un cuerpo flotará hasta que se lo ve realmente sobre la superficie del agua.

> Los elementos no operan excepto en cuanto son pesados o ligeros. Decir, por lo tanto, que la madera de abeto no se hunde porque el aire predomina en ella, nada agrega a decir que no se hunde porque es menos pesada que el agua. Y más aún: la causa inmediata es que es menos pesada que el agua; y el predominio del aire es la causa de que el peso sea más ligero. Por lo tanto, cualquiera que presenta el predominio de un elemento como la causa, ofrece la causa de la causa, y no la causa próxima e inmediata. Ahora bien, ¿quién no sabe que la causa verdadera es la inmediata y no la mediata? Por otra parte, quien alega el peso ofrece una causa bien conocida a los sentidos, porque es fácil averiguar si el ébano o el abeto, por ejemplo, son más o menos ligeros que el agua. Pero, ¿cómo sabemos si la tierra o el aire predomina en ellos? Seguramente, no hay mejor experimento que observar si flotan o se hunden. Se sigue que si alguien ignora que un sólido flota, salvo si sabe que el aire predomina en él, no sabe si flota hasta que lo ve flotar.[53]

Este pasaje engloba tres elementos esenciales de lo que sería más tarde el método científico. Primero, afirma que debemos buscar las causas próximas y no las remotas; segundo, elimina del campo de la ciencia las hipótesis no verificables; y tercero, destaca la importancia de la predicción. El predominio de un elemento, aducido por los aristotélicos, nada nos dice acerca del comportamiento de los cuerpos antes de que realicemos efectivamente los experimentos. Ni siquiera logra determinar en qué compuestos predomina el aire, el agua, la tierra o el fuego. Por ejemplo, el hierro flota en el mercurio; pero como Aristóteles afirma que el aire predomina en el mercurio y la tierra en el hierro, el elemento predominante en el aire se convierte en una cualidad ambigua.

---

51. Carta a Tolomeo Nozzolini, *ibid.*, p. 309.
52. Castelli, *Risposta alle opposizioni*, *ibid.*, p. 665, nota 2. Este pasaje no se incluía en la versión impresa.
53. Galileo, *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, *ibid.*, p. 87.

Los peripatéticos pretendían tener la prueba experimental de que el agua disminuía de volumen al congelarse, y señalaban el espacio vacío que quedaba entre la superficie del agua y la parte congelada en una botella.[54] Galileo comenta que el hielo sale también por el cuello de las botellas en invierno, y que éstas se rompen a menudo porque el hielo bloquea sus cuellos. Puesto que esto no se puede verificar en el verano, propone un experimento que se puede hacer en cualquier época del año. Consiste en colocar unos pocos trozos de hielo en una botella llena a medias de agua y observar si el nivel del agua sube cuando el hielo se derrite, como asegura la teoría peripatética, o si desciende, como él predice. La prueba es fácil de hacer, y el resultado confirma la posición de Galileo.

Otra interesante teoría aristotélica afirma que un barco flota mejor en el mar que en el puerto. Es difícil verificar esta hipótesis por el movimiento del mar, pero Galileo saca la cuestión del reino del debate teórico inconcluyente sugiriendo un experimento práctico. Se coloca una vasija pequeña en un tanque de agua y se llena con municiones hasta el punto en que una munición más haría que se hundiera. Se coloca luego la vasija en un tanque cien veces más grande, y se cuenta la cantidad de municiones adicionales necesarias para hundir la vasija. «Que Grazia haga el experimento... Yo ya lo he hecho y sé que se equivoca.»[55]

Galileo estudiaba las consecuencias prácticas de otras teorías de sus oponentes y las confrontaba, de modo devastador, con la experiencia. Si los llamados cuerpos «ligeros» tenían una tendencia natural a moverse hacia arriba, se moverían más rápidamente en un medio que ofreciera menos resistencia, por ejemplo en el aire y no en el agua. Pero esto es incorrecto porque los cuerpos que ascienden rápidamente a través del agua se detienen cuando alcanzan la superficie o se frenan considerablemente cuando entran en el aire. Del mismo modo, si la forma produjera diferencias en el hundimiento de los sólidos, dos cilindros de madera de tamaños diferentes no flotarían igualmente bien. Sin embargo, la razón entre la parte sumergida y la parte que está por encima del agua, es idéntica independientemente de la forma.

---

54. Los aristotélicos, e igualmente los antiaristotélicos, apoyaban en general, en el siglo XVI, la suposición de que el volumen del agua disminuía al congelarse (ver Charles B. Schmitt, «Experimental Evidence for and against a Void: the Sixteenth Century Arguments», *Isis*, n.º 58 [1967], pp. 357-359). El Accademico Incognito mencionaba esta creencia (*Opere di Galileo*, Vol. IV, pp. 153-154), y Colombo introducía el problema del espacio vacío entre el hielo y el agua (*ibid.*, p. 346). A Colombo no le quitaba el sueño que el hielo disminuyera de volumen al fundirse; sostenía que, como el agua había *disminuido* al congelarse, «no había ninguna razón para que no *disminuyera* nuevamente al fundirse» (*ibid.*, p. 349).

55. Castelli, *Risposta alle opposizioni*, *ibid.*, p. 756. Éste es uno de los raros casos en que Galileo dice explícitamente que ha realizado el experimento.

La importancia que Galileo asigna a los experimentos no involucra una acumulación inexorable de confirmaciones. Su confianza en la uniformidad de la naturaleza[56] y su certeza de que existe una causa básica implican la creencia de que bastaba con uno o, a lo sumo, unos pocos experimentos bien elegidos. La ciencia, para Galileo, es un modelo explicativo de conceptos geométricos lógicamente conectados que proceden de unos pocos principios, y preferiblemente uno solo. La «verdadera causa» de la flotación de los cuerpos se determina mediante la aplicación del principio de las velocidades virtuales a la hidrostática. El único experimento que se estudia con extensión en la primera parte del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, es el modelado de una bola de cera en varias formas para demostrar que la forma no influye en el movimiento de los cuerpos. Galileo considera que esto es suficiente para establecer la relevancia del razonamiento geométrico y para permitirle proceder deductivamente. Puede predecir con seguridad el resultado de nuevos experimentos desde su butaca: esto explica por qué insiste en la verificación experimental y, sin embargo, se contenta con tan pocos experimentos reales.

Galileo reconoce el uso regulador de la experimentación pero su preocupación principal es la coherencia interna de su teoría. Está dispuesto a transigir acerca de la forma y el carácter de los diquecillos; pero es inflexible acerca de la profundidad de las depresiones causadas por láminas delgadas de metal en la superficie del agua. La razón es clara: diferentes explicaciones de la fuerza que sostiene los diquecillos son compatibles con su teoría principal, pero la profundidad a que se hunden las placas delgadas es un resultado directo de su «causa próxima e inmediata», es decir, «el exceso de la gravedad y los momentos del agua sobre la gravedad y los momentos de la lámina».

Otro ejemplo de la respuesta de Galileo a la necesidad de coherencia es su solución del problema planteado por el aparente choque de principios en su explicación de la formación del agua. Por una parte, afirma que el hielo es agua rarificada porque es más ligero que el agua; por otra parte, mantiene que la propiedad del frío es condensar. Pero, si el hielo se forma por condensación, ¿cómo puede ser agua rarificada? La solución de Galileo es un tributo al arte de la lógica y no al arte de la experimentación: el hielo se forma, asegura, no principalmente de agua sino del aire que está encima del agua. ¡Es, por lo tanto, aire condensado o vapor de agua rarificado![57]

---

56. Colombo acusaba a Galileo de adherirse demasiado estrictamente a este principio: «La causa de tu erróneo razonamiento es tu rechazo a permitir que la misma causa pueda producir efectos diferentes en el mismo cuerpo» (*Discorso Apologetico*, *ibid.*, p. 327).

57. Apostilla a las *Considerazioni... da Accademico Incognito*, *ibid.*, pp. 192-193.

Los estudiantes se inician generalmente con las conclusiones que les transmiten sus maestros, y Galileo no era una excepción. Era discípulo de Arquímedes, y como tal empezó a investigar el problema de los cuerpos flotantes. Sólo cuando su intento se demostró inadecuado, amplió su enfoque incluyendo el método más dinámico que sugiere el seudoaristotélico *De Mechanica*. El punto decisivo fue el descubrimiento crucial de que él había supuesto erróneamente que un sólido desaloja siempre un volumen de agua igual al suyo. No detectó este error a través de la experimentación sino en el proceso de elaborar los teoremas que necesitaba para explicar la flotación de los cuerpos en el agua.

Galileo luchó vigorosamente contra el autoritarismo de los escolásticos que sólo permitían a la naturaleza afirmar lo que Aristóteles le había oído decir. Sin embargo, no escapó a la acusación de reintroducir otra autoridad en la persona de Arquímedes. Como estaba convencido de que el principio de Arquímedes era la verdadera expresión de la Ley de la naturaleza, sentía que podía declarar imposible la tensión superficial, y determinar *a priori* la profundidad a que se hundirá, al flotar, una delgada lámina metálica. Su error inicial lo condujo a un mayor conocimiento del uso regulador de los experimentos, pero los aplicó sólo a los casos que no habían sido rigurosamente deducidos de ciertos principios. Los experimentos no debían ser numerosos; era esencial que estuvieran bien elegidos. Un experimento bien elegido en el que se pudiera variar un elemento por vez, era suficiente para confirmar una teoría, siempre que dicha teoría estuviera articulada matemáticamente y que permitiera pronósticos acerca del comportamiento de los objetos físicos. La tecnología y la tradición artesanal no participaban directamente en el debate sobre la hidrostática. Lo que resulta significativamente diferente en el enfoque de Galileo, cuando lo comparamos con el de sus adversarios aristotélicos, no es tanto su actitud hacia la experimentación como su doble creencia en la relevancia de las matemáticas y en el carácter progresivo de la ciencia. Galileo estaba convencido de que el conocimiento humano no había alcanzado su tope en la ciencia griega y de que se podían abrir nuevas perspectivas mediante la aplicación de la geometría a los problemas físicos.

3

LAS MANCHAS SOLARES Y LOS CIELOS INCONSTANTES

En el otoño de 1611, Christopher Scheiner, un profesor jesuita de la Universidad de Ingoldstadt, escribió tres cartas a su amigo Mark Welser, de Augsburg, informándole que había descubierto manchas en el sol. Welser editó estas cartas y envió copias al extranjero, y en particular a Galileo y a los miembros de la Accademia dei Lincei.[1] Como sus superiores habían prohibido a Scheiner usar su verdadero nombre, temiendo que estuviera equivocado y desacreditara a la Compañía de Jesús, él ocultó su identidad bajo el seudónimo de *Apelles latens post tabulam.* Galileo, sin embargo, lo identificó como jesuita y lo censuró en dos cartas que envió a Welser en 1612. Cuando Scheiner publicó una versión más amplia de sus puntos de vista en su *Accuratior Disquisitio,* Galileo replicó con una tercera carta a Welser, y el año siguiente, el príncipe Federico Cesi publicaba en Roma las cartas de Galileo.

Las Tres Epistolae *de Scheiner*

En su primera carta, de fecha 12 de noviembre de 1611, Scheiner afirmaba que había detectado manchas en el sol siete meses antes, pero que no les había prestado atención hasta que las observó nuevamente en octubre. Su reacción, al verlas esa vez, fue sospechar que se debían a un defecto de su vista, a una falla en las lentes o tal vez a alguna perturbación de la atmósfera. Examinó cuidadosamente estas tres hipótesis y las rechazó como insatisfactorias. Las manchas no se podían atribuir a un defecto de la vista porque varios observadores las habían advertido independientemente. Y no se podía culpar a las lentes porque se habían ob-

1. El fundador de la Accademia dei Lincei, el príncipe Federico Cesi, recibió a Galileo durante su visita a Roma en la primavera de 1611, cuando era extensamente aclamado por sus descubrimientos celestiales. «Si estuviéramos en la antigua república romana», escribía el cardenal Francesco Maria del Monte, «estoy seguro de que se habría levantado una estatua en el Capitolio en su honor» (Carta a Cosimo II del 31 de mayo de 1611, *Opere di Galileo,* Vol. XI, p. 119).

tenidos los mismos resultados con ocho telescopios diferentes. Finalmente, las perturbaciones atmosféricas quedaron descartadas por varias razones: en primer lugar, dado el pequeño diámetro visual del sol, ninguna nube o vapor podía seguir el movimiento diurno del sol, desde la salida hasta la puesta; en segundo lugar, las manchas no mostraban desplazamientos paralácticos; en tercer lugar, su movimiento sobre el sol era constante; y, en cuarto lugar, se podían ver a través de nubes tenues. Scheiner concluía que las manchas estaban «o en el sol, o fuera del sol, en alguna región celestial». Pero no disimulaba la hipótesis que prefería:

> Siempre he considerado inconveniente situar manchas más oscuras que cualquiera vista en la luna (con la excepción de alguna pequeña) en el cuerpo brillante del sol. No es plausible, porque si estuvieran sobre el sol, su movimiento implicaría que el sol gira, y entonces veríamos regresar las manchas en el mismo orden y en la misma posición que tenían entre sí y con respecto al sol. Hasta ahora, nunca han reaparecido aunque otras manchas han seguido a las primeras a través del disco solar. Esto indica claramente que no están en el sol. Por lo tanto, no pienso que sean manchas, sino más bien cuerpos que eclipsan parcialmente al sol, es decir, estrellas o bien situadas entre el sol y nosotros o bien girando alrededor del sol.[2]

Añadía –sin más especificaciones– que este descubrimiento permitía a los astrónomos resolver dos problemas importantes de la astronomía: la posición de Venus y Mercurio, y el tamaño relativo del sol. Advertía a Welser que sus diagramas eran toscas aproximaciones, y explicaba cómo observaba las manchas solares. Su método consistía en poner una lente neutral, azul o verde, sobre el objetivo; mirar directamente al sol al amanecer y al anochecer; observar las manchas a través de nubes; y espiar brevemente el sol del mediodía, sobre todo en el centro de la circunferencia.

En la segunda carta, Scheiner recordaba a sus lectores que las *Ephemerides* de Magini (un libro corriente de referencia para astrónomos prácticos), pronosticaban una conjunción del sol y de Venus, de cuarenta horas, para el 11 de diciembre a las 11 horas de la noche. En función de esta información, observó a Venus el 12 de diciembre, esperando que, si Venus estaba entre el sol y la tierra, lo vería como una mancha de tamaño excepcional sobre la superficie del sol. Como la mancha no apareció, Scheiner consideró varias explicaciones posibles; quizá sus observaciones fueran imprecisas; los cálculos de Magini podían estar equivocados; Venus podía brillar con luz propia, o –lo que era más simple– Venus quizá no giraba alrededor de la tierra sino alrededor del sol. Recha-

2. Christoph Scheiner, *Tres epistolae de maculis solaribus* (Augsburg, 1612), *ibid.*, Vol. V, p. 26.

zaba las dos primeras interpretaciones porque había hecho sus observaciones con gran cuidado, y Magini era famoso por su precisión. En cuanto a la hipótesis de que Venus tuviera luz propia, chocaba con «los experimentos, los argumentos, y la doctrina común de todos los matemáticos». Concluía, por lo tanto, que Venus giraba alrededor del sol.[3]

La tercera carta, fechada una semana más tarde, anunciaba que ahora era posible «liberar completamente al sol de la ofensa de las manchas». Si las manchas estaban en el sol, debían regresar en la misma posición y orden cada quince días. Habiendo observado las manchas durante dos meses, Scheiner estaba razonablemente seguro de que éste no era el caso y de que, por lo tanto, las manchas no estaban en el sol. No había tenido en cuenta que la forma y el tamaño de las manchas cambiaban considerablemente, hasta el punto de ser irreconocibles durante el período en que eran visibles, algo que se veía claramente en sus propios diagramas de las manchas solares. También era obvia la implicación de que se podían tornar irreconocibles durante los quince días siguientes; pero sólo para una mente dispuesta a aceptar la premisa necesaria, es decir, que en los cielos era posible un cambio real, y no una mera reorganización de las partes. No se puede acusar a Scheiner de ignorar esa posibilidad, pero debemos decir que nunca la consideró seriamente. Educado para pensar dentro del marco de referencia cosmológico tradicional, se resistía a admitir cualquier imperfección en el sol. Desde el comienzo, había pensado en proteger la inmutabilidad de los cielos, adecuando los nuevos datos a la vieja teoría. El argumento que propuso revela su prejuicio metodológico tácito.

La ausencia de paralaje obligaba a Scheiner a localizar las manchas cerca del sol, pero su negativa a permitir un cambio en los cuerpos celestes impedía la posibilidad de considerar la idea de que fueran nubes, «porque, ¿quién pondría nubes allí? Si eran nubes, ¿qué cantidad habría? ¿Por qué se moverían todas en la misma dirección? ¿Cómo podían producir sombras tan grandes?»[4]

Situar manchas en el sol habría significado admitir un cambio radical en el cosmos aristotélico; ver estrellas nuevas sólo implicaba afirmar que siempre habían estado allí, aunque sin ser vistas. Las manchas *debían ser* estrellas, y Scheiner, decidido a encontrar pruebas, veía una indicación segura de que las manchas tenían fases, como la luna, en el oscurecimiento ocasional del lado de las manchas que estaba más cerca

3. Scheiner comprendió posteriormente que había supuesto que las tablas indicaban el comienzo de la conjunción, pero que ellas daban probablemente el tiempo medio. Pidió a Welser que enviara una nota a aquellos a quienes había remitido las *Cartas*, sugiriendo esa lectura alternativa y explicando que, incluso por este motivo, debería haber aparecido una gran mancha sobre el sol (*ibid.*, Vol. V, p. 32). Esto refleja la ciencia de la época: los astrónomos profesionales podían tener dudas sobre la correcta interpretación de sus propias tablas.

4. *Ibid.*, p. 30.

del borde del sol. Convencido de que había encontrado la respuesta correcta, extendió sus conclusiones a los satélites de Júpiter y sugirió que eran más numerosos que los cuatro descubiertos por Galileo. Era una generalización apresurada, que no contribuiría precisamente a ganarle el favor de Galileo, como había de comprobar muy pronto.

Las cartas de Galileo

Galileo contestó a Welser el 14 de mayo de 1612. Alegaba su mala salud como excusa por su tardanza, y lamentaba que la dificultad del tema combinada con su incapacidad para hacer observaciones continuas, mantenía, por el momento, su juicio en suspenso. Pero esto no le impedía expresar su crítica de otras interpretaciones, y después de informar a Welser que ya había observado las manchas solares dieciocho meses antes, procedió a administrar al autor de las *Tres Epistolae* una vigorosa réplica.

Galileo admitía que las manchas eran reales pero se resistía a aceptar que fuera correcto describir su movimiento como un movimiento hacia el este o el oeste, y reprochaba a Scheiner que ignorara el descubrimiento telescópico de las fases de Venus, que por sí solo no dejaba «ningún lugar a dudas acerca de la órbita de Venus». Criticaba además que Scheiner cayera en una petición de principio al suponer que si las manchas estuviesen en el sol, regresarían cada quince días, como si no estuvieran sujetas a auténticas alteraciones. Trazaba luego una analogía entre las manchas solares y las nubes; admitía el eventual descubrimiento de otros satélites y planetas, y concluía afirmando que consideraba improbable que las estrellas acompañantes de Saturno (los anillos de Saturno) experimentaran algún cambio.

Poco tiempo después de despachar esta carta, irritó a Galileo el rumor, procedente de Bologna, de que su trabajo era ridiculizado en círculos académicos; decidió entonces publicar su descubrimiento de las manchas solares que justificadamente creía anterior.[5] Escribió a varios amigos influyentes y envió una segunda carta a Welser, en la que presentaba su propia teoría sobre las manchas solares. En resumen, afirmaba que las manchas eran contiguas a la superficie del sol; que tenían propiedades análogas a las de las nubes, y que eran arrastradas por la rotación del cuerpo solar. Argumentaba que su interpretación, basada en las relaciones matemáticas entre las manchas, se ajustaba a los datos observacionales, en tanto que la explicación de Scheiner llevaba a inconsisten-

5. Galileo, Johann Fabricius, Thomas Harriot, Christoph Scheiner y Domenico Passignani observaron independientemente las manchas (Antonio Favaro, *Oppositori di Galileo. III. Christoforo Scheiner* [ed. Carlo Ferrari, Venecia, 1919], 57 folios).

cias y contradicciones. Scheiner sólo conoció esta segunda carta algún tiempo después y, mientras tanto, escribió un corto tratado sobre las manchas solares. Adquirió la forma de tres cartas a Welser, de fechas 16 de enero, 14 de abril y 25 de julio de 1612, y se publicó en el verano del mismo año con el título de *De maculis solaribus et stellis circa Jovem errantibus accuratior disquisitio.* Era, en relación con las *Tres Espistolae,* lo que la *Segunda Carta* de Galileo con la *Primera:* daba forma matemática al *insight* original. Scheiner comprendía que su razonamiento se desmoronaba si no podía demostrar que la conjunción de Venus y el sol debía determinar una gran mancha en la cara del sol. Recurría a la equivocada observación de Kepler de un eclipse de Mercurio, pero se apoyaba sobre todo en «el acuerdo general de los filósofos y los matemáticos, tanto antiguos como modernos»: citaba a Platón y a sus discípulos, a Ptolomeo y a sus seguidores, a Clavius y a su escuela, como testigos del hecho de que Venus podía eclipsar el sol. Mencionaba las fases de Venus –la única prueba convincente– pero no les atribuía especial relieve.

Scheiner incluía treinta diagramas muy inferiores a los de Galileo, y anunciaba el descubrimiento de un quinto satélite alrededor de Júpiter.[6] Trataba de dar prestigio a las manchas solares, nada menos, recordando no sólo los nombres de los astrónomos que las habían observado realmente, sino también una larga lista de «luminarias de nuestro tiempo que habían admitido inmediatamente el hecho», aunque no lo habían visto.[7]

La actitud de Scheiner nos recuerda que la investigación científica siempre está impulsada y guiada por un motivo; en este caso, el deseo de preservar la inalterabilidad del cielo. No es extraño, por lo tanto, que describa un eclipse de sol en los términos siguientes: «vimos *lo que estábamos buscando:* la parte de la luna que cubría el sol era tan traslúcida como el cristal o cualquier otra especie de vidrio, pero en forma irregular».[8] Esa luna traslúcida permitía que Scheiner explicara la luz secundaria de la luna sin mencionar el reflejo de la tierra, que contradecía la doctrina aristotélica. Lo que sucedía aquí –lo llamaremos el hechizo de

6. Christoph Scheiner, *De maculis solaribus et stellis circa Jovem errantibus accuratior disquisitio* (Augsburg, 1612), *Opere di Galileo,* Vol. V, p. 46. Scheiner dedicaba su nuevo satélite a Welser. Posteriormente, Giovanni Tarde y Charles Malapert llegaron a dedicar manchas solares-estrellas, todavía más fantásticas, a las familias reinantes de Francia y Austria (G. Tarde, *Borbonia Sidera. id est planetae qui solis limina circumvolitant motu proprio ac regulari, falso hactenus ab helioscopis maculae solis nuncupati* [Paris, 1620], y C. Malapertius, *Austriaca sidera heliocyclica astronomicis hypothesibus illigata* [Douay, 1633]).

7. Estas luminarias incluían al cardenal Borromeo, Andrea Chiocco, G. A. Magini, Angelo Grillo, Ottavio Brentoni, Leonardo Ceronico, Reinhard Ziegler, Simon Stevin, Johann Kepler, John Pretorius y J. G. Brengger (Scheiner, *Accuratior disquisitio. Opere di Galileo,* Vol. V, p. 62).

8. *Ibid.,* p. 67, cursivas del autor.

la teoría– es lo mismo que le sucedió a Galileo, pocos años más tarde, durante la controversia de los cometas, cuando recurrió a varias piruetas para mantener que los cometas eran exhalaciones surgidas de la tierra, y no cuerpos celestes.

Pero todo esto era mera ilusión y el mismo Scheiner comprendió que los cimientos de su teoría se habían resquebrajado:

> Aún se duda si las manchas están en el sol o lejos de él; si son generadas o no; si se pueden considerar nubes o no. Pero una cosa parece muy segura: no se pueden mantener ya las enseñanzas corrientes de los astrónomos acerca de la solidez y la constitución de los cielos, especialmente en las regiones del sol y de Júpiter. Es conveniente, por lo tanto, que escuchemos al principal matemático de nuestro tiempo, Christopher Clavius que, en la última edición de sus obras, e impulsado por estos fenómenos recientemente descubiertos (aunque antiguos en sí mismos), recomienda a los astrónomos que empiecen a pensar en algún otro sistema cósmico.[9]

En este contexto, el primer nombre que acudía a la mente de Scheiner no era el de Copérnico sino el de Tycho Brahe, que había de ser el mentor de la versión revisada del viejo sistema mundial, el líder de quienes se consideraban «conservadores progresistas».

A Galileo le hubiera gustado replicar con corrosiva ironía, pero contuvo su agudeza para que Mark Welser, que había llegado a ser miembro de la Accademia dei Lincei, no se ofendiera. Es divertido ver cómo admite el león lo difícil que le resulta no rugir: «Quisiera mostrar de qué necia manera el J[esuita] ha tratado este asunto, y darle la reprimenda que se merece. Pero hacer esto, sin ofender al Signor Welser, no es empresa sencilla».[10] Galileo logró por fin mantener un tono cortés, y despachó la tercera carta a Welser, que refutaba punto por punto la *Accuratior Disquisitio*, el 1.º de diciembre de 1612.

El problema de la verificación

El interés del debate sobre las manchas solares no se funda tanto en el tema como en el método de verificación y confirmación que Galileo desarrolló en esa ocasión. Inicialmente, evitó comprometerse con cualquier posición explícita. «Es más difícil para mi descubrir la verdad que refutar lo falso, y me parece que sé qué no son las manchas solares, y no

9. *Ibid.*, pp. 68-69. Scheiner no daba la referencia precisa, pero probablemente se trataba de la sección final de la última edición del *Comentario sobre la esfera de Sacrobosco*, de Clavius (Christopher Clavius, *Opera Omnia*, volumen III [Mainz, 1611], p. 75 del *Commentarium in Sphaeram Joannis de Sacro Bosco*, separadamente compaginado).

10. Carta a F. Cesi, 4 de noviembre de 1612, *Opere di Galileo*, Vol. XI, p. 426.

lo que son realmente.»[11] La *Primera Carta* despejaba el camino para una teorización posterior refutando la interpretación propuesta por Scheiner. Galileo demostraba que los argumentos de Scheiner se apoyaban en la suposición injustificada de que el sol sera inalterable y de que las manchas sólo podían estar en el sol si no cambiaban de forma. Censuraba incoherencias, como afirmar primero que Mercurio giraba alrededor del sol en una órbita más pequeña que la de Venus, y sostener luego, invirtiendo el orden, que Venus tenía un paralaje más pequeño. Atribuía estas incertidumbres a la limitación ejercida por todo un hábito general del pensamiento acerca de los problemas de la astronomía planetaria: «[Scheiner] ha comenzado a atender y aceptar una filosofía sólida y veraz... pero no puede librarse todavía de esas fantasías preestablecidas a las que retorna a causa de su uso y hábito prolongados».[12]

La diferencia entre los postulados metodológicos de Scheiner y los de Galileo se manifiesta claramente en la clase de problemas que estaban dispuestos a enfrentar: algunas preguntas que le parecen ridículas a Scheiner, son totalmente naturales para Galileo:

> A su pregunta: «¿Quién pondría nubes alrededor del sol?», responderé: «Cualquiera que viese tales manchas y quisiera decir algo verosímil acerca de su esencia, porque nada hallará, que conozcamos, más parecido a ellas». A su pregunta sobre el tamaño de las manchas, contestaré: «Tan grandes como vemos que son con respecto al sol; tan grandes como esas nubes que algunas veces cubren una gran provincia de la tierra», y si esto no bastara, diré que dos, tres, cuatro y diez veces más. Y finalmente, ante la tercera imposibilidad que Scheiner aduce –¿cómo pueden ser tan oscuras?–, contestaré que no son tan oscuras como las densas nubes que a veces se interponen entre el sol y nuestros ojos.[13]

Se podía inferir la conjetura de Galileo de su crítica a las hipótesis de Scheiner, pero él se negaba a comprometerse públicamente con la opinión de que las manchas eran contiguas al sol. Imponía esta cautela el temor a que su nombre quedara asociado con una teoría que pudiera eventualmente demostrarse errónea. Pero, tres semanas después de escribir la *Primera Carta*, encontró «demostraciones rigurosas» de su teoría, y el 2 de junio de 1612 escribió al Cardenal Maffeo Barberini que ya la había confirmado. En su *Segunda Carta* a Welser, declaraba que «observaciones cotidianas continuas me han demostrado, con todas las confirmaciones imaginables y sin ninguna contradicción, que mi opinión se ajusta a los hechos».[14]

---

11. Galileo, *Istoria i dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti* (Roma, 1613), *Opere di Galileo*, Vol. V, p. 95.
12. *Ibid.*, p. 102.
13. *Ibid.*, p. 108.
14. *Ibid.*, p. 116.

Después de resumir los datos existentes, Galileo distinguía entre lo que era inmediatamente obvio a la percepción sensorial y lo que se debía lograr razonadamente, a partir de la evidencia aportada por la observación.

> Sus diferentes densidades y grados de oscuridad, sus cambios de forma, sus acercamientos y separaciones son en sí mismos manifiestos para nuestros sentidos sin ninguna necesidad de razonamiento, como mostrará una mirada a los diagramas que incluyo. Pero es preciso que la razón deduzca y determine si las manchas son contiguas a la superficie del sol y si son arrastradas por su rotación, a partir de ciertas propiedades particulares (*certi particolari accidenti*) que las observaciones de nuestros sentidos nos suministran.[15]

La intención de Galileo era doble; en primer lugar, mostrar que «todas las apariencias concuerdan con la hipótesis de que las manchas son contiguas a la superficie del sol, y de que son arrastradas por él, sin ningún inconveniente ni dificultad», y, en segundo lugar, probar que las hipótesis rivales eran falsas debido a sus «obvias incoherencias y contradicciones».[16]

Consideraba separadamente los dos problemas teóricos: la distancia de las manchas al sol y la rotación del sol. En la primera parte, Galileo probaba que las manchas eran contiguas a la superficie. Sus argumentos se apoyaban en tres características de las manchas solares que no se podían explicar de otra manera. Primero, las manchas parecían más tenues cuando estaban más cerca del borde del sol que del centro. Segundo, la distancia que recorrían aumentaba cuando se aproximaban al centro y disminuía cuando se movían hacia la circunferencia. Finalmente, se separaban más y más a medida que se movían hacia el centro.

> Para quienes comprendan, en virtud de la perspectiva, lo que significa la fuga de una superficie esférica junto al borde del hemisferio visto, será evidente que si el sol es un globo y si las manchas están próximas a la superficie solar, cuando son arrastradas por esa misma superficie hasta el centro, siempre aumentan de ancho mientras mantienen la misma altura.[17]

Galileo argumentaba que si el movimiento tenía lugar en círculos, incluso a distancias cortas del sol, los espacios atravesados en tiempos iguales parecían diferir muy poco, las manchas no se tornarían más estrechas, y las distancias entre ellas no variarían notablemente. Consideraba este último argumento «tan convincente que por sí sólo sería suficiente para probar lo que se discute».[18] Su demostración, basada en la

15. *Ibid.*, p. 117.
16. *Ibid.*, p. 118.
17. *Ibid.*, p. 119.
18. *Ibid.*, p. 121.

reducción de tamaño de las manchas sobre una superficie esférica, se puede resumir, con la ayuda del diagrama que Galileo presenta (figura 8), de la siguiente manera:

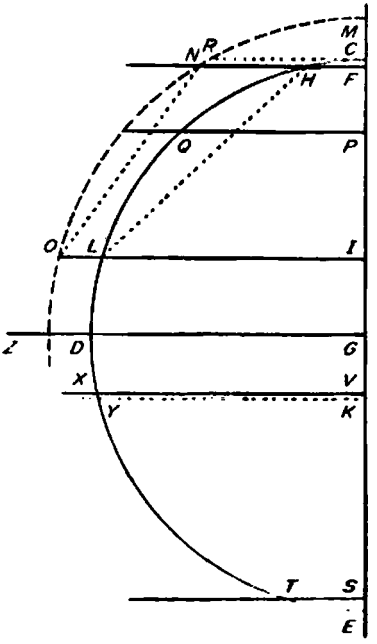


FIGURA 8

Si CE = diámetro del sol, y CDE = un paralelo de latitud sobre la circunferencia del sol, donde Galileo observó, desde el 1.º de julio al 8 de julio de 1612, dos manchas, A y B.

Si G = centro del sol

Z = posición del observador terrestre, y

CZ = distancia del sol a la tierra

Debido a la gran distancia del sol, se supone que los rayos que llegan del sol son paralelos.

Por las observaciones hechas el 1.º de julio, si

CF = distancia observada entre la mancha A y la circunferencia del sol, y

FI = distancia observada entre la mancha A y la mancha B.

Se trazan *FH* e *IL* en ángulo recto con *CE*, cortando *CDE* en *H* y *L* respectivamente. Como *H* y *L* = posiciones actuales de las manchas, y

F e *I* = posiciones aparentes, por lo tanto

FI = distancia aparente.

A medida que las manchas se mueven hacia el centro, la distancia aparente entre ellas aumenta, puesto que se ven cada vez menos oblicuamente, hasta que se revela su distancia real *HL* cuando están cerca del centro.

El 5 de julio, las manchas *A* y *B* estaban a igual distancia del centro, y la separación entre ambas era igual a la recta *HL*.

El 8 de julio, la mancha *B* se desvió del punto *E* a una distancia igual a la que separaba de *C* la mancha *A* el 1.º de julio.

Si *SE* = distancia observada entre la mancha *B* y la circunferencia

SV = distancia observada entre la mancha *B* y la mancha *A*.

Se trazan *ST* y *VX* en ángulo recto con *CE*, como en el caso anterior. Y midiendo *TX*, se obtiene:

$$TX = HL$$

Galileo argumentaba que si las manchas se encontraban más lejos, en una órbita, se hallaría una contradicción con las razones observadas.

Si el arco *MNO* = órbita de las manchas solares que se alejan de la superficie solar un 1/20 de *CE*; si se prolonga *FH* hasta encontrar a *MNO* en *N*, e *IL* hasta encontrar a *MNO* en *O*, la distancia real entre las manchas *A* y *B* = *NO*, considerablemente menor que *HL*.

Cuando las manchas *A* y *B* se han movido hasta encontrarse a igual distancia del centro, la distancia observada entre ellas debería ser igual a *NO* ya que, por las observaciones hechas el 5 de julio, su distancia es igual a *HL*. En otras palabras, las razones implicadas por la hipótesis de que las manchas no están en el sol contradicen las razones observadas en la realidad.

Incluso si el arco *MNO* distara de la superficie tan solo una centésima parte del radio solar, las razones inferidas estarían aún en contradicción con los datos de la observación:

> Sea, por ejemplo, el arco *CH* de 4°. Entonces, la recta *CF* será igual a 24 partes si el radio *CG* es igual a 10.000 partes; y la cuerda *CH* a 419 partes, es decir, diecisiete veces más grande que *CF*. Ahora bien, si el radio *GM* fuera mayor por sólo una centésima parte del radio *GC*, de modo que *GC* fuera igual a 10.000, *GM* equivaldría a 10.100, y entonces el arco *MR* tendría 8°4'; el arco *NRM*, 8°58'; el arco *RN*, 0°54'; y su cuerda, 94, cuando *CF* fuera 24, es decir, apenas cuatro veces más grande. Esto va contra la experiencia, que concuerda con la otra interpretación.[19]

19. *Ibid.*, p. 124.

El argumento de Galileo requiere algún comentario:
Si el ángulo $GHC = 4°$, y
$CF = 24$, entonces
$GF = 9976$.
Pero si éste es el caso, entonces
$HF = 698$, y
$RC = 698{,}4$, y no como afirma Galileo, 419.
Del mismo modo, si el ángulo $NGR = 0°54'$, entonces
$RN = 158$, y no como afirma Galileo, 94.
Sin embargo, la razón entre los valores correctos 698/158 y la razón de los valores dados por Galileo, 419/94, dan aproximadamente el mismo valor, es decir, 4,4. Es posible que se haya arrastrado un error de un cálculo a otro (como un factor de «scaling»). En un examen más atento, sin embargo, no parece que haya sido así, y quizás la aproximación (4,418 a 4,468) sea puramente accidental, porque el argumento de Galileo no es afectado por el error numérico. Sus cálculos de los ángulos implícitos son muy precisos, y no dependen de ningún modo del valor 419, sino sólo de los senoversos 24 y 100 y del uso de buenas tablas. Parece que adoptó el valor 419, correspondiente a 2°24', en vez del supuesto 4°, sin advertirlo, y que no consultó nuevamente las tablas para la cuerda *RN* de 54' o 0,9°. Puesto que se refiere a ángulos pequeños, a los cuales los senos son aproximadamente proporcionales, probablemente dedujo el último mediante una razón equivalente a $RN/419 = 0{,}9/4$; $RN = 3771/4 = 94$ [0,3].

En la segunda parte de la carta, Galileo concluía que el sol rotaba y arrastraba las manchas, aunque no pretendía que todas su hipótesis estuvieran igualmente bien confirmadas. Consideraba que poseía una prueba auténtica de la contigüidad de las manchas a la superficie del sol, pero sólo probabilidades acerca de la rotación del cuerpo solar, y aún más incertidumbre en cuanto a la hipótesis de que las manchas que desaparecían, retornaban quince días después. Al final de su *Segunda Carta*, había arriesgado originalmente una especulación más amplia y atrevida:

> Los filósofos naturales *(i fisici)* tendrán en el futuro amplias oportunidades para especular acerca de la sustancia y de la forma en que se produce la disolución, en breves periodos, de cosas tan grandes que algunas superan en tamaño, con gran ventaja, a África y Asia completas, y a las dos Américas. No me atrevería a decir nada definitivo sobre este problema, pero me gustaría llamar la atención de las mentes inquisidoras sobre el hecho de que la aparición de todas las manchas solares en esa franja del globo solar que está por debajo de la parte del cielo donde vagan y residen los planetas, y no en cualquier otra parte, indica que quizás los planetas desempeñan algún rol en la producción de semejante efecto. Y si, de acuerdo con la opinión de un escritor famoso de la antigüedad, se suministrara a tan gran

> lámpara alguna compensación por la difusión de tanta luz a los planetas que giran a su alrededor, entonces, puesto que ella debería tomar la ruta más corta, no podría alcanzar ninguna otra parte de la superficie solar.[20]

Este pasaje no apareció en la edición impresa de las *Cartas*, pero estaba incluido en la primera copia manuscrita enviada a Roma, y G. B. Agucchi lo elogió en su carta a Galileo del 1.º de diciembre de 1612.

El rol de las matemáticas

Los datos sólo hablan el lenguaje de la teoría en que están inscriptos. Esto no implica negar la importancia de la observación cuidadosa para refutar y confirmar las teorías, sino recordar que el experimento –a diferencia de la simple experiencia– es una pregunta que hacemos a la naturaleza. Como señalaba A. Koyré, la revolución galileana se puede reducir al descubrimiento del lenguaje de la naturaleza; al descubrimiento de que las matemáticas son la gramática de la ciencia. Mientras los aristotélicos creían que las propiedades cualitativas revelaban la esencia de las cosas, Galileo sostenía que las relaciones cuantitativas eran las verdaderas claves para la comprensión de la realidad. Sin un modelo geométrico, la estructura de las cosas permanecía confusa; era para el matemático, y sólo para él, que ciertas relaciones estaban repletas de significado.[21] Lo que Galileo llama «perspettiva» es lo que le permite advertir el significado de que las manchas fueran más tenues cerca del borde, de que su velocidad aumentara a medida que se acercaban al centro, y de que el intervalo entre ellas se ampliara a medida que se alejaban del borde. Galileo insistía en que las proporciones matemáticas se estudiaran con cuidado. En un pasaje característico, escribió:

> Es necesario, por lo tanto, observar diligentemente con qué proporción crece y luego disminuye la velocidad de las manchas, desde que aparecen hasta que se esconden, pues por esa proporción se podrá luego demostrar si el movimiento se realiza en la superficie del cuerpo solar o en un círculo separado de ella.[22]

---

20. *Ibid.*, p. 140, comentario de la línea 26. Galileo no desarrolló su conjetura de que los planetas producían las manchas solares. En 1615, especulando sobre el carácter del sol, lo describía como el receptáculo de una sustancia universal y sutil que penetraba todas las cosas vivientes (carta a Piero Dini, 23 de marzo de 1616, *ibid.*, p. 301). Comparaba también el sol con el corazón humano, y vinculaba la revolución de los planetas con la rotación del sol sobre su eje (*ibid.*, p. 304; carta a Christina de Lorraine, 1615, *ibid.*, p. 345).

21. Por ejemplo, para indicar que un triángulo es recto, basta decir a un geómetra que el cuadrado de un lado del triángulo es igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados. Para un no iniciado, esta información es sólo una afirmación acerca de las longitudes de los lados que nada dice acerca de la forma del triángulo.

22. Galileo, *Istoria e dimostrazioni*, *Opere di Galileo*, Vol. V, p. 105.

Los nuevos datos de la observación se convierten en pruebas cuando se interpretan matemáticamente. Galileo estaba convencido de que el mismo Aristóteles habría modificado sus puntos de vista si hubiera contemplado lo que él podía ver, es decir, «*sensati accidenti che a più certe conclusioni c'invitano*». ¿Cuáles son estos «*sensati accidenti*» capaces de invitarnos a conclusiones más seguras que las de los libros de texto tradicionales? Son los cometas, las estrellas nuevas y las manchas solares; pero es la geometría la que descifra su significado:

> Para alejar toda duda de nuestras mentes, algunos han recibido, por inspiración de una virtud superior, rigurosos métodos de demostración (*metodi necessarii*), mediante los que comprendemos que los cometas se originan en la región celestial.[23]

Un «método riguroso» es la determinación del paralaje y su interpretación en términos matemáticos. Pero antes de argumentar desde la posición ventajosa de la geometría, Galileo deseaba mostrar, con la ayuda del sentido común, que las manchas no estaban en la atmósfera sino en la superficie del sol. Si se aceptaba, por consideración al argumento, que estaban próximas al sol, no podían ser más grandes que las nubes más pequeñas, ya que ocupaban una parte tan pequeña de la superficie solar. Pero esto suscitaba ya una multitud de dificultades: ¿cómo, si eran de tamaño tan pequeño, tendrían suficiente densidad para resistir la evaporación? ¿Por qué todas las manchas debían caer entre la tierra y la luna? Y además, ¿cómo podían las manchas seguir el rápido movimiento del sol si se sabía que otros fenómenos atmosféricos recorrían distancias mucho más grandes en unos pocos momentos? Galileo pensaba que estas objeciones no se podían contestar «sin introducir grandes improbabilidades». Pero, ¿qué impediría a sus oponentes añadir unos pocos epiciclos a sus pensamientos para tornar lógicamente inexpugnables sus posiciones? «Afortunadamente –comentaba Galileo–, tenemos demostraciones necesarias que no admiten réplica.» Entre ellas, la principal era la interpretación matemática de la idéntica distribución de las manchas desde cualquier punto de la tierra desde donde fueran observadas.[24]

En manos de Galileo, la geometría se convirtió en una herramienta para demostrar que la teoría de Scheiner contradecía sus propios datos observados:

> Pero incluso si fuéramos incapaces de comparar los diagramas ya hechos con los que se harán en el futuro, me parece que podemos demostrar que las cosas que Apelle ha propuesto y admitido implican contradicción. Es

23. *Ibid.*, pp. 139-140.
24. *Ibid.*, pp. 128-129.

razonable, por lo tanto, dudar de la verdad de su supuesta observación y, en consecuencia, de la conclusión que deduce de ella.

Scheiner tenía que suponer que todas las manchas estaban en una órbita, pero también debía aceptar el hecho de que no se extendían más allá de los 30° al norte o al sur del ecuador solar. «Una vez aceptado esto, creo que puedo demostrar la ineficacia de lo que aduce aquí como argumento para situar las manchas lejos de la superficie del sol.»[25] En primer lugar, Galileo demostraba que, cuando dos manchas, una en el ecuador y la otra encima o debajo de él, atravesaban el disco solar, la razón de sus tiempos era más pequeña que la razón de las distancias recorridas. Examinaba luego la afirmación de Scheiner de que una mancha atravesaba la superficie del sol en el ecuador en dieciséis días, en tanto que otra, en cualquier otra latitud, tardaba catorce días; y señalaba que si la diferencia de tiempo aumentaba solamente en tres horas y media (de modo que la razón era de dieciséis días a trece días, veinte horas y media), el resultado era imposible, puesto que la razón de los tiempos no podía ser mayor que la razón del diámetro y la longitud del círculo a 30° de latitud. Scheiner evitaba el absurdo, pero esto no tornaba convincente su argumento; si una mancha, situada a 30° del ecuador solar atravesaba la superficie del sol en seis séptimos del tiempo empleado por una mancha en el ecuador, debía estar situada en una órbita cuyo radio fuera el doble del radio solar. Pero en ese caso, las manchas parecerían moverse a la misma velocidad, y no variaría la distancia entre ellas. Incluso una ligera discrepancia en la velocidad de las manchas que atravesaban el disco solar exigiría que la más rápida estuviera a 50° o 60° al norte o al sur del ecuador del sol, «lo que discreparía no sólo con mis observaciones sino también con las de Apelle».[26]

Galileo consideraba que la existencia de planetas entre el sol y Mercurio era una posibilidad real, pero sostenía que no parecerían manchas solares, como suponía Scheiner, porque su movimiento sería a la vez demasiado rápido y demasiado uniforme. Demasiado rápido, porque se encontrarían en una órbita más pequeña que la de Mercurio, que pasaba por detrás del disco solar en aproximadamente seis horas; demasiado uniforme, porque deberían estar demasiado próximas al sol para no dar impresión de angostamiento, como ocurre en una superficie esférica.

Galileo estaba convencido de que la geometría ponía punto final a lo que sería de otro modo un debate interminable e inútil. Por esta razón, consideraba a los matemáticos precursores de las ciencias físicas. En realidad, Galileo distinguía dos categorías de hombres: los astrónomos expertos a quienes «bastaba comprender lo que escribía Copérnico en su

25. *Ibid.*, pp. 204-205.
26. *Ibid.*, p. 216.

De Revolutionibus para convencerse de que Venus giraba alrededor del sol, así como de la verdad del resto del sistema copernicano», y los hombres de inteligencia ordinaria «que no se convencían por la necesidad de las demostraciones geométricas», sino que requerían la prueba adicional de los cometas, las novas y las manchas solares.[27]

La importancia de las observaciones

Galileo tenía plena conciencia de que el rol arquitectónico de las matemáticas presuponía la medición cuidadosa de los datos existentes. En la *Primera Carta*, se excusaba porque la imposibilidad de hacer observaciones continuas mantenía en suspenso su juicio; y sólo cuando las «observaciones cotidianas» confirmaron sus conjeturas se sintió dispuesto a publicarlo. Envió a Scheiner «observaciones y diagramas de las manchas solares, más precisos en cuanto a forma y a sus cambios de posición, y dibujados sin un pelo de error y de modo muy elegante por un alumno mío», esperando que «puedan servirle para especulaciones posteriores acerca de su carácter» (*le quali potranno essergli per avventura di giovamento nel filosofare circa la loro essenza*).[28] Galileo destacaba que las fases de Venus (la prueba concluyente de su movimiento heliocéntrico),[29] y la correspondencia entre las manchas brillantes y oscuras sobre el sol, sólo se podían confirmar o desaprobar mediante la observación. Criticaba a Scheiner porque no había advertido la diferencia entre las manchas que aparecían y desaparecían en la circunferencia y aquellas que se generaban en el centro, y porque había considerado una cortina de puntos en movimiento como si fuera una gran mancha. Y con mayor seriedad reprobaba que hubiese tomado una estrella por un quinto satélite de Júpiter:

> Quisiera que Apelle observara su número con diligencia renovada. Encontrará que no son más que cuatro, y que el quinto que menciona es, incuestionablemente, una estrella fija. Las conjeturas que lo llevaron a creer que era un planeta, se fundan en varias falacias. Está claro que, en primer lugar, sus observaciones han sido con frecuencia incorrectas, como yo advierto en sus diagramas, porque omite una estrella que a esa hora era visible. En segundo lugar, casi todas las distancias de los satélites entre sí y con respecto a Júpiter son erróneas, supongo que por la falta de un méto-

27. *Ibid.*, pp. 195 y 140.

28. *Ibid.*, p. 113. Benedetto Castelli era el alumno a quien Galileo enseñó la manera de dibujar los diagramas de las manchas solares, mediante la proyección de la imagen del telescopio sobre una hoja de papel (*ibid.*, p. 117).

29. Al carecer de telescopio, Copérnico estaba obligado a afirmar que Venus o tenía luz propia o era transparente.

> do y un instrumento adecuados para medirlas. En tercer lugar, comete errores graves acerca de sus desplazamientos y luego toma uno por otro, confundiendo las más de las veces el más distante con el más cercano, y no logra reconocerlos de una noche a la siguiente.[30]

Los aristotélicos reaccionaron ante el descubrimiento de las manchas solares sugiriendo que eran agrupaciones de estrellas esencialmente inmutables. Cuando los jesuitas propusieron una versión revisada de la doctrina de la inalterabilidad de los cielos, en un debate público en el Colegio Romano, en el verano de 1612, un dominicano señaló que las estrellas eran redondas y de forma regular, y que las manchas solares no lo eran. Los jesuitas replicaron que no se podía esperar que un racimo de estrellas pareciera redondo y regular. A Galileo este razonamiento le pareció insustancial:

> Porque, si bien es cierto en general que muchos objetos son, por su distancia o su pequeñez, invisibles por sí solos, quizás, unidos, pueden formar un agregado perceptible para nuestra vista. Sin embargo, no podemos detenernos ante esta vaga generalización; debemos estudiar las propiedades particulares observadas en las estrellas y las observadas en las manchas, y examinar cuidadosamente con qué grado de concordancia unas y otras pueden combinarse y coincidir.[31]

Puesto que se habían observado pequeñas estrellas que apenas tenían la cincuentava parte del tamaño de las grandes, era tentador conjeturar que cincuenta estrellitas semejantes, juntas, podían dar la impresión de una mancha solar con un diámetro visual del tamaño de una estrella grande. Galileo observó, sin embargo, que así como era improbable que cincuenta barcos, moviéndose a diversas velocidades, se unieran y permanecieran juntos por cualquier período de tiempo, igualmente improbable era que cincuenta estrellas se reunieran y formaran una mancha solar que durara varios días. Galileo señalaba también que la hipótesis de una luna traslúcida, sugerida por Scheiner, implicaba una cantidad de consecuencias que la observación contradecía. Si la luna era traslúcida, no reflejaría la luz; el límite entre la parte directamente iluminada por el sol y el resto desaparecería o se tornaría borroso; las montañas de la luna serían invisibles (los rayos simplemente las atravesarían); y, finalmente, el resplandor del hemisferio lunar situado frente al sol se mantendría invariable o, si cambiara, parecería más oscuro en el momento de la luna nueva, en que los rayos tendrían que penetrar la capa más gruesa de la sustancia lunar. «Estas consideraciones –escribía Galileo–, y muchas otras que omito para ser breve, establecen que esta hipó-

30. Galileo, *Istoria e dimostrazioni*, *Opere di Galileo*, Vol. V, p. 227.
31. *Ibid.*, p. 232.

tesis está en desacuerdo con las apariencias, en tanto que si adoptamos hipótesis verdaderas y manifiestas, como que la luna es opaca e irregular y que refleja la luz del sol sobre la tierra, podemos responder a cualquier problema con admirable facilidad y perfección.»[32]

Igualmente importante es el rol desempeñado por la observación en el descubrimiento de analogías familiares para interpretar la naturaleza de las cosas que no se pueden experimentar directamente. Esto presupone la capacidad de disponer las pruebas en un orden sugestivo, arte en el que Galileo era un maestro. Por ejemplo, en su *Primera Carta*, escribía:

> Las manchas solares se generan y destruyen en períodos más amplios o más cortos; algunas se condensan y otras crecen mucho de día en día. Cambian de forma. Muchas son irregulares, y más o menos oscuras en diversos lugares. Su tamaño debe ser enorme puesto que están sobre el sol o muy cerca de él, y velan la luz del sol en grados variables debido a su opacidad irregular. A veces se observan muchas manchas, a veces pocas, y a veces ninguna en absoluto.

Estas observaciones sugieren una analogía al astrónomo, cuyo marco de referencia cósmico le permite pensar en el sol como en otro planeta, dotado de propiedades similares a las que experimenta sobre la tierra. «Ahora bien: de todas las cosas con las que estamos familiarizados, sólo las nubes son objetos enormes que se producen y disuelven en plazos breves, duran períodos más largos o más cortos, cambian fácilmente de forma, y son más densos y opacos en algunas zonas que en otras.»[33] En el modelo opuesto, en que los cuerpos celestes eran esencialmente diferentes de los sublunares, las estrellas eran la única analogía a mano. Pero las estrellas y las manchas solares, como observaba Galileo, diferían en aspectos importantes, mientras que las propiedades que compartían eran demasiado generales para ser útiles:

> No se debe llamar a las manchas solares estrellas, porque sean opacas, más densas que el material del cielo, resistan al sol, se iluminen con más fuerza de un lado y produzcan una sombra profunda del otro, etc. Estas propiedades son comunes a las rocas, a la madera, a las nubes más densas y, en una palabra, a todos los cuerpos opacos. Una bola de mármol resiste por su opacidad la luz del sol, se aclara por donde él la ilumina y se ensombrece del lado contrario, como la luna y Venus, y por esas razones podría llamarse una estrella; pero le faltan otras condiciones más esenciales –de las cuales carecen también las manchas solares– y por esto no se les debe atribuir el nombre de estrellas.[34]

32. *Ibid.*, p. 225.
33. *Ibid.*, p. 106.
34. *Ibid.*, p. 109.

Por lo tanto, para Galileo los datos de la observación desempeñaban un rol doblemente sugestivo: llamaban la atención hacia posibles analogías entre objetos familiares, y sugerían modelos geométricos que tenían las mismas relaciones espaciales. Cuando los modelos rivales competían por la explicación de las proporciones y razones observadas, era necesario estudiar sus consecuencias, y seleccionar el mejor sobre la base de su capacidad de adaptarse a los hechos con la mayor precisión.

La observación demostraba también que el recurso a las «autoridades» era ya una actitud perimida: Galileo desechaba por irrelevantes las citas de autores famosos sobre una variedad de asuntos, a causa de las nuevas evidencias existentes sobre el brillo propio de Venus y el tamaño de su diámetro visual, la inmutabilidad del sol y la constitución de los cielos. Juzgaba que esas nuevas observaciones eran el «funeral» y «el juicio final» de la seudofilosofía. El libro de la naturaleza reemplazaba finalmente la palabra impresa.[35]

Los experimentos mentales

Ya hemos visto en nuestro estudio del *Discurso acerca de los cuerpos flotantes* que Galileo se apoyaba sobre todo en la geometría, y que apelaba a los experimentos mentales más que a los reales. Consideraremos dos ejemplos de este método en el debate sobre las manchas solares.

Al final de la *Segunda Carta*, Galileo declaraba que no sabía con certeza si las manchas giraban alrededor del sol porque el sol rotaba o porque giraba el medio circundante. Elegía la primera alternativa y daba dos razones, o, más bien, indicaba dos líneas de argumentos, para apoyar su punto de vista. Primero, señalaba que los cambios continuos en la forma de las manchas sugerían que el medio circundante era fluido y blando, y que un material semejante no podía explicar el movimiento

35. La expresión «libro de la naturaleza» era un viejo cliché (ver E. R. Curtius, *Europäische Literatur und lateinisches Mittelalter* [ed. A. Francke, Berna, 1954], pp. 323-329), y su origen es probablemente bíblico. Galileo cita dos pasajes de las Escrituras en su *Juvenilia*: «Caeli sicut liber complicabuntur» (*Is.*, n.° 34, 6), y «Caelum sicut liber involutus recessit» (*Rev.*, n.° 6, 14), (*Opere di Galileo*, Vol. I, p. 64). Campanella, en su *Apologia pro Galileo*, publicada en Frankfurt, en 1622, habla también de «el mundo, que es el libro de Dios» (pp. 20 y 24). Sin embargo, la convergencia entre Campanella y Galileo es meramente aparente. Lo decisivo de esta metáfora son los caracteres en los que se supone que está escrito el libro de la naturaleza. Para Campanella, estos caracteres son los números y las formas de las constelaciones, mientras que para Galileo son únicamente las relaciones matemáticas. Eugenio Garin critica a E. A. Curtius por no lograr distinguir los diferentes contextos en los que se utiliza la expresión «libro de la naturaleza» (Eugenio Garin, *La cultura filosófica del Rinascimento* [ed. Sansoni, Florencia, 1961], pp. 451-465). No hay duda, sin embargo, que la expresión llegó a ser el grito de guerra de la nueva filosofía en la época de Galileo, como se puede ver en las cartas de Orazio Morandi y G. B. Baliani (*Opere di Galileo*, Vol. XI, p. 530; Vol. XII, p. 18).

ordenado y constante de las manchas. Esto hacia probable, por lo tanto, que el movimiento se originara en el cuerpo sólido del sol. Segundo, sostenía que incluso si el medio giraba, comunicaría su movimiento al globo solar al que, por ser indiferente al movimiento circular, haría girar fácilmente. Introducía la siguiente analogia para ilustrar esta afirmación:

> Un barco que hubiera recibido un impulso en un mar tranquilo, giraría continuamente alrededor de nuestro globo sin detenerse nunca; y puesto en reposo, reposaría para siempre si, en primer lugar, se pudieran eliminar todos los impedimentos extrinsecos y, en segundo lugar, si no se añadieran causas externas de movimiento.

Sobre la solidez de este experimento mental, Galileo hacía una generalización atrevida, y concluía que, si el sol había sido puesto en movimiento por el medio giratorio, continuaría girando para siempre, y esto no alteraría la disposición de las manchas solares, así como no cambia la posición de los objetos en la cabina de un barco, cuando el barco da la vuelta al globo: «en lo que respecta a la constitución de las partes, un movimiento semejante es como si no existiera». Esta opinión nos lleva muy lejos por el camino del principio de inercia newtoniano, pero no llega al final por dos razones. En primer lugar, Galileo era incapaz de apartarse completamente de la experiencia: sostenía que el movimiento real sobre los planetas esféricos era circular y no lineal. En segundo lugar, se resistía a abandonar la idea del movimiento natural, que utilizaba para apoyar su tesis acerca del movimiento indiferente.

> Esto quizás se confirme más adelante porque, además de lo que se ha dicho, no parece que cualquier cuerpo móvil pueda demostrar repugnancia a un movimiento sin tener tendencia natural al movimiento contrario, porque en la indiferencia está la no repugnancia. Por esto, cualquiera que quisiera atribuir al sol una resistencia al movimiento circular de su medio circundante, le estaría atribuyendo una tendencia natural al movimiento circular en la dirección contraria. Pero esto no puede atraer a una mente bien equilibrada.[36]

Igual interés posee el experimento de Galileo para demostrar que la tierra, contrariamente a la doctrina común, refleja los rayos del sol hasta la luna. El texto publicado en la *Tercera Carta* dice lo siguiente:

> Además, deberíamos convencernos del reflejo efectivo de la tierra cuando vemos cuánta luz se refleja en una habitación oscura, sólo iluminada por el reflejo de una pared alumbrada por los rayos del sol. *Incluso si la luz re-*

36. Galileo, *Istoria e dimostrazioni, Opere di Galileo*, Vol. V, p. 227.

> *flejada entra por una abertura tan pequeña que, en el lugar donde cae, su diámetro visual no es más grande que el de la luna*, esta luz secundaria es tan poderosa que cuando se refleja de la primera habitación a una segunda, será todavía más fuerte que la luz de la luna. Esto puede experimentarse de modo claro y fácil, viendo que más sencillo es leer un libro con el segundo reflejo de la pared que con el reflejo directo de la luna.[37]

Las precisas indicaciones del pasaje que he puesto en cursivas sugieren vigorosamente que el experimento se realizó; pero la carta de Galileo del 25 de enero de 1613 al Príncipe Cesi, en la que contesta a las objeciones de su amigo Luca Valerio, no da esa misma impresión.

> El punto que sostiene el Signor Valerio es cierto: el mismo cuerpo brillante ilumina más de cerca que de lejos. Pero también es cierto que los cuerpos brillantes, de tamaños diferentes pero de la misma luminosidad, no iluminan igualmente; a la misma distancia, un cuerpo grande dará más luz que uno pequeño, y a distancia mayor dará igual cantidad de luz. Por lo tanto, cuando tengo en cuenta el reflejo que proviene de una pared y lo comparo con el de la luna, es cierto que el de la pared está más cerca, pero la luna es incomparablemente más grande, y siempre he tenido la intención de comparar el reflejo de la luna con el de una pared cuyo tamaño sea proporcional a la distancia de la luna, de modo que la habitación oscura, donde se permite que entren el reflejo de la luna y de la pared, reciba la luz de la pared a través de una abertura que no excede, en apariencia, el diámetro visual de la luna. Por lo tanto, para explicar más claramente mi intención, las palabras siguientes se pueden añadir al pasaje referido a...[38]

Las palabras añadidas son las que he puesto en bastardillas en la anterior cita de la *Tercera Carta*. Resulta claro, por esta razón, que Galileo no realizó jamás el experimento. Si lo hubiera hecho, habría comprendido (y mencionado, es de esperar) la dificultuad de permitir que sólo el reflejo de la pared penetre en la habitación oscura. Un lector ansioso de repetir el experimento –y un lector semejante habría sido raro en el siglo XVII– se hubiera preguntado cómo aislar una pared alumbrada por el sol del mediodía, a fin de asegurar que sólo la luz reflejada penetrara en una habitación oscura a través de una abertura estrecha.

Los errores de Galileo

Nuestro estudio sobre el procedimiento experimental de Galileo quedaría incompleto si no consideráramos algunos de los errores que cometió y no nos preguntáramos si eran inevitables. Examinaremos cuatro casos.

---

37. *Ibid.*, p. 223, cursivas del autor.
38. Carta a Cesi, 25 de enero de 1613, *ibid.*, Vol. XI, p. 467.

1) El disco del sol, como lo vemos normalmente en el cielo, parece uniformemente brillante, pero la observación telescópica más superficial disipa esta impresión y revela que el resplandor decrece desde el centro hacia los bordes. Scheiner descubrió esto, pero Galileo lo descartó porque no estaba «confirmado generalmente mediante el experimento». Luca Valerio, que también se refirió a este asunto, recibió la siguiente réplica:

> A mi adversario le corresponde demostrar que los rayos de la parte central del disco solar son más fuertes. Además, el experimento que se me podría exigir no es imposible, ni siquiera difícil; porque al mirar la salida y la puesta del sol, no parece más brillante en el centro que cerca de la circunferencia, y cuando miramos el círculo que el sol forma en una hoja de papel, después de pasar por el telescopio, vemos que es igualmente brillante en todas partes.[39]

Galileo manifestaba naturalmente cierto rechazo a admitir un hecho que un adversario aducía como prueba de una teoría rival, y exigía instintivamente pruebas adicionales antes de dedicarle consideración seria. Sin embargo, sus propios experimentos eran bastante poco satisfactorios. La salida y la puesta del sol se observan a través de una capa atmosférica más gruesa que el sol del mediodía, y esto hace más difícil observar diferencias de brillo. Asimismo, juzgar el brillo del sol por su proyección sobre el papel es inconcluyente.

2) Una segunda fuente de dificultad era la ligera inclinación del eje del sol (7°15') desde la perpendicular al plano de la eclíptica. Durante el curso del circuito anual de la órbita terrestre, vemos el sol, y la dirección de su rotación, en una variedad de perspectivas ligeramente diferentes. La línea de intersección entre el plano del ecuador del sol y el de la eclíptica está orientada de tal modo que la tierra la atraviesa a comienzos de junio y de diciembre. En esos momentos, el sol se ve exactamente de perfil; las manchas describen líneas rectas paralelas al ecuador a medida que la rotación del sol las arrastra alrededor del disco. En las épocas intermedias, el ecuador y los paralelos de latitud aparecen más o menos curvados hacia el norte o hacia el sur a causa de la perspectiva de la superficie esférica, en tanto que se ve primero un polo, y luego el otro.

En la *Tercera Carta*, Galileo decía que las líneas rectas trazadas por las manchas eran una «prueba necesaria» de que el eje del sol era perpendicular a la eclíptica. Scheiner, más cauto, no se atrevía a afirmar que el movimiento de las manchas era paralelo a la eclíptica. Sin embargo, sería incorrecto concluir que las observaciones de Galileo eran imprecisas; se dio la circunstancia de que observó las manchas de mayo a julio, aproximadamente en el momento en que la tierra cruzaba la línea

39. *Ibid.*, p. 466.

de intersección entre los planos del ecuador solar y la eclíptica y, por lo tanto, cuando las manchas se movían paralelamente a la eclíptica.[40]

3) El tercer error se refiere a la rotación del sol. El sol no rota como un cuerpo sólido y el periodo de rotación depende de la latitud, tornándose progresivamente más lento desde el ecuador hasta el polo, como indica la siguiente tabla:

Latitud	*Periodo*
0°	24,9
10°	25,0
20°	25,3
30°	25,9
40°	27,5

Galileo afirmaba, en contra de Scheiner, que todas las manchas, en cualquier latitud que estuvieran, atravesaban el sol en el mismo tiempo, que estimaba en «apenas más de catorce días». Pero ni siquiera en la mancha más remota observada por Galileo, a los 30°, el tiempo real llega a trece días completos. G. B. Agucchi, amigo y admirador de Galileo en Roma, daba el valor correcto, ¡y añadía que los propios diagramas de Galileo permitían sólo una pequeña fracción por encima de los trece días![41] No está nada claro el motivo de que Galileo haya añadido medio día a los tiempos entre la primera y la última observación de las manchas solares en los bordes del disco solar, y este error es muy desconcertante.

4) Los astrónomos modernos en general están de acuerdo en que las manchas son probablemente depresiones de la fotosfera. Así lo sugiere su apariencia, que cambia a consecuencia de la perspectiva; por ejemplo, muestran los mismos rasgos que las cavidades lunares: la sombra indica el fondo de la depresión, y la penumbra, la pared inclinada. Es in-

40. Galileo descubrió posteriormente su error y utilizó la declinación de las manchas, en su *Diálogo acerca de los dos sistemas máximos del mundo*, como un argumento para la revolución anual de la tierra alrededor del sol (*ibid.*, Vol. VII, pp. 373-382). Ver más adelante, capítulo 6, pp. 174-175. Stillman Drake ha argumentado convincentemente que probablemente Galileo comprendió su error cuando leyó la carta de Francesco Sizzi a Orazio Morandi, que el último le envió en el verano de 1613 (Drake, *Discoveries and Opinions of Galileo*, p. 125, n. 14).

41. «Supones que algunas veces las manchas cruzan el disco del sol en aproximadamente quince días; pero nunca las he visto más que por un tiempo apenas superior a los trece días.» En el margen de la carta, Agucchi añadía: «Los diagramas de tus propias observaciones permiten sólo una pequeña fracción por encima de los trece días» (carta a Galileo, 1.° de diciembre de 1612, *Opere di Galileo*, Vol. XI, p. 442). Era la segunda vez que Agucchi interpretaba mejor las observaciones de Galileo que el mismo Galileo. Previamente, había determinado los periodos de los satélites de Júpiter a partir de los diagramas publicados en el *Sidereus Nuncius* (carta a Galileo, 29 de octubre de 1611, *ibid.*, Vol. XI, p. 225).

teresante que Scheiner haya tenido en cuenta la posibilidad de esta hipótesis, que Galileo descartó resueltamente porque no le parecía digna de seria consideración.[42]

El nuevo realismo

Resulta obvio, para el historiador de las ideas, que la nueva ciencia no podía tener status ontológico en la vieja metafísica, ni valor epistemológico en la vieja psicología. Es igualmente evidente que el nuevo enfoque de la realidad física se anticipaba a su organización en una filosofía coherente del conocimiento humano. Galileo no aplicaba conscientemente una nueva filosofía de la naturaleza, a pesar de que utilizaba muy deliberadamente las matemáticas para interpretar el movimiento de los cuerpos en el cielo y en la tierra. Las etapas precisas en el desarrollo de su método son un tema en debate, pero no puede haber ninguna duda de su firme adhesión, desde el principio, a las ideas de orden y sencillez. Rechazaba la hipótesis de que las manchas eran acumulaciones de estrellas, porque esto habría significado introducir en el cielo «movimientos innumerables, irregulares, tumultuosos y desiguales», lo que no concordaba «con ninguna filosofía plausible». Se negaba a aceptar que una estrella tan brillante como una de primera magnitud pudiera desaparecer completamente en diez días, y afirmaba que la misma mancha retornaba después de una revolución completa porque estaba convencido de que no podía disminuir de tamaño más rápidamente de lo que aumentaba. Su creencia en el orden y en la regularidad lo llevó incluso a hacer una de sus predicciones más desventuradas: como no pudo observar ninguna variación en el movimiento de Saturno y sus estrellas compañeras (en realidad, los anillos de Saturno), escribió en la *Primera Carta* que «la razón, basada en nuestra experiencia de todos los otros movimientos estelares, nos da la certeza de que no se verá jamás ninguna». Sin embargo, en el momento en que escribía la *Tercera Carta*, siete meses más tarde, las estrellas compañeras no sólo se habían movido: ¡habían desaparecido completamente![43]

Galileo estaba dispuesto a afirmar que la constitución del universo era, «única, verdadera, real», que no podía ser de otra manera, y que la naturaleza no sólo era ordenada, sino inmutable en sus leyes:

> Debemos recordar que la naturaleza, sorda e inexorable ante nuestras súplicas, no cambiará el curso de sus acontecimientos, y que las cosas que

42. Scheiner, *Accuratior disquisitio*, *ibid.*, Vol. V, p. 51; Galileo, *Istoria e dimostrazioni*, *ibid.*, p. 202.

43. Galileo, *Istoria e dimostrazioni*, *ibid.*, pp. 110 y 227.

> investigamos ahora (y que, más tarde, explicaremos a otros) no aparecen una vez y luego desaparecen. Siguen y seguirán su curso durante mucho tiempo, de modo que muchas personas las verán y observarán.[44]

Estos puntos de vista, como tales, no eran originales ni exclusivos de Galileo. Aunque el sistema del mundo fuera único, era igualmente justificado preguntarse si podía ser conocido. Los astrónomos del momento predecían hábilmente eclipses y conjunciones con la ayuda de epiciclos deferentes y otros instrumentos matemáticos. Concordaban acerca de la existencia de un sistema en astronomía; pero pocos, si es que había alguno, se hubieran aventurado a afirmar que su modelo cósmico particular era real. Éste no era sólo el punto de vista de los adversarios de cuello almidonado de Galileo. También lo compartía Giulio Cesare Lagalla, el profesor de filosofía de la Sapienza, de Roma, con quien Galileo mantenía buenas relaciones. Jacopo Mazzoni, una mente sensible que reflejaba las tendencias conflictivas de la época, estimaba que los matemáticos eran instrumentalistas filosóficos. En su *In Universam Platonis et Aristotelis Philosophiam Praeludia*, sostenía que el astrónomo *(mathematicus)* y el filósofo natural *(physicus)* estudiaban el apogeo y perigeo de la luna, y los senderos de Marte y de Venus, desde puntos de vista completamente diferentes. Mientras el astrónomo daba una interpretación puramente formal de estos movimientos, el filósofo natural estudiaba su naturaleza física.[45]

Galileo no hacía esta distinción, como se puede deducir de su acusación a Scheiner por sostener que:

> Los excéntricos, deferentes, equantes, epiciclos, y demás, eran cosas verdaderas, reales y distintas. Los astrónomos puros *(i puri astronomi)* los aceptaban para facilitar sus cálculos, pero no las consideraban reales los astrónomos filosóficos *(astronomi philosophi)* quienes, al ir más allá de la preocupación de conservar las apariencias, de cualquier modo, tratan de investigar la verdadera constitución del universo: el problema más importante y admirable que existe. Porque esa constitución existe: es única, verdadera, real, y no puede ser de otra manera y, debido a su grandeza y dignidad, debería considerarse en primer lugar entre las cuestiones de interés teórico.[46]

---

44. *Ibid.*, pp. 218-219.

45. Jacopo Mazzoni, *In Universam Platonis et Aristotelis Philosophiam Praeludia* (Venecia, 1597), p. 160.

46. Galileo, *Istoria e dimostrazioni*, *Opere di Galileo*, Vol. V, p. 102. Este pasaje probablemente provocó la siguiente apología de Sagredo: «Aunque en las cartas que yo escribía, distinguía entre filósofos y matemáticos (cosa que objetas), quiero que sepas que he empleado estas palabras de acuerdo al uso común entre la gente ordinaria, que llama filósofos a quienes no comprenden ni pueden comprender la naturaleza y que, por otra parte, pretenden ser los secretarios de la naturaleza, y utilizan esta reputación para perturbar los sentidos

Pero se mantiene el interrogante crucial. ¿Cómo se debe implementar este programa? Básicamente, mediante la lectura del libro de la naturaleza, en lugar de «clavar la vista, día y noche, en un mundo impreso en hojas de papel, sin alzarla nunca hacia el mundo verdadero y real, hecho por las propias manos de Dios, que está siempre abierto ante nuestros ojos, para nuestra instrucción».[47] Nadie en sus cabales podía rechazar este tipo de principio general y, por supuesto, nadie lo hizo. Cualquier persona era bastante empirista para creer que se podía aprender algo mirando el mundo que nos rodea. El conocimiento real era posible, pero ¿qué clase de conocimiento? Los aristotélicos también defendían el conocimiento real; pero para ellos esto significaba penetrar en la «esencia» de las cosas e interpretar su naturaleza en los términos de los cuatro elementos básicos. Galileo dio un paso atrás para no dar la impresión de que aceptaba un punto de vista elemental sobre la ciencia.

> Sé muy bien que la sustancia de las manchas puede ser mil cosas que no conocemos ni imaginamos. Las propiedades que observamos en ellas, es decir, su forma, su opacidad y su movimiento, que son muy comunes, no pueden proporcionarnos ningún conocimiento, o uno muy escaso y general.[48]

Este pasaje aparece en la *Primera Carta*, seguido por una comparación de las propiedades de las estrellas con aquéllas de las nubes que favorecen la idea de que las manchas solares son similares a las últimas y no a las primeras.

En este punto, había ciertas contradicciones en el proceso de pensamiento de Galileo, porque, para probar que las manchas eran como nubes y no como estrellas, recurría a esos mismos «accidentes» que consideraba demasiado generales para determinar la naturaleza de los cuerpos; es decir, cuestionaba la forma, la densidad y el movimiento de las manchas, y en el párrafo final de la carta, prometía enviar a Scheiner diagramas precisos para contribuir a «ulteriores especulaciones acerca de su naturaleza». La razón de Galileo para menospreciar el valor del material que él mismo utilizaba se puede inferir tal vez del borrador original de la carta, donde el pasaje que estamos considerando finalizaba de la siguiente manera:

---

de los hombres, e incluso para privarlos de su inteligencia» (carta a Galileo, 18 de agosto de 1612, *ibid.*, Vol. XI, p. 379). En *Diálogo acerca de los dos sistemas máximos del mundo*, Galileo distinguia nuevamente entre el *«astronomo puro calcolatore»* y el *«astronomo filosofo»* (*ibid.*, Vol. VII, p. 369).

47. Galileo, *Istoria e dimostrazioni*, *ibid.*, Vol. V, p. 96, comentario de la línea 19.

48. *Ibid.*, pp. 105-106.

> ... no nos pueden proporcionar ningún conocimiento, o uno muy escaso y general, que difícilmente valga la pena, como si pregunto cuál es la sustancia de la luna y alguien contesta *una parte más densa de la región celeste.*[49]

Galileo quería mostrar que las inferencias de sus adversarios eran triviales y científicamente irrelevantes; pero, al hacerlo así, atacaba las pruebas mismas, la base de su propia generalización. Comprendió su error táctico y borró de su carta el pasaje más incriminador, pero sólo en su *Tercera Carta* llegó a una posición más coherente y sutilmente expuesta. En ellas encontramos su manifiesto del «realismo crítico», si se nos permite la expresión.

> Podemos tratar, especulando, de penetrar la esencia verdadera e intrínseca de las sustancias naturales, o también contentarnos con el conocimiento de algunas de sus propiedades. Sostengo que tratar de llegar a la esencia es empresa imposible y vana fatiga tanto en lo que concierne a las sustancias elementales más próximas, como a las más remotas y celestiales. Soy igualmente ignorante, me parece, acerca de la sustancia de la tierra como acerca de la sustancia de la luna, las nubes o las manchas solares. Y no veo que tengamos ninguna ventaja para comprender las sustancias próximas, aparte del número de casos particulares, aunque todos igualmente desconocidos. Erramos entre ellos, y pasamos de uno a otro con poco o ningún provecho. Si pregunto yo cuál es la sustancia de las nubes y me responden que un vapor húmedo, desearé saber qué es el vapor. Quizá se me diga que es agua, la cual, atenuada por el calor, se resuelve en vapor. Igualmente curioso acerca de qué es el agua, trataré entonces de averiguarlo, y sabré por fin que es ese cuerpo fluido que corre por nuestros ríos y que constantemente tratamos y manipulamos. Pero este conocimiento del agua no es más profundo que el que poseía inicialmente de las nubes; tan sólo está más cerca, y depende de más sentidos. Del mismo modo, no sé más, acerca de la verdadera esencia del fuego o de la tierra, que de las del sol o la luna. Este conocimiento se nos concederá en el estado de beatitud, y no antes. Pero si deseamos concentrar nuestra mente en comprender algunas de las propiedades de las cosas, me parece que no tendremos que desesperar de poder adquirir esta clase de conocimiento, tanto acerca de los cuerpos lejanísimos como de los próximos; y en algunos casos quizás con mayor precisión en el caso de los primeros que de los segundos. ¿Quién no comprende los períodos y movimientos de los planetas mejor que los de las aguas en nuestros mares? ¿Acaso no se ha descubierto mucho antes, y con mucha mayor facilidad, la forma esférica de la luna que la de la tierra? ¿Acaso no se discute aún si la tierra misma está en reposo o si vaga por el cielo, mientras que conocemos positivamente los movimientos de muchas estrellas? Infiero, por lo tanto, que aunque quizá sea vano tratar de determinar la sustancia de las manchas solares, no se sigue de esto que no podamos conocer algunas de sus propiedades, como su situación, movi-

49. *Ibid.*, p. 106, comentario de la línea 3, cursivas del autor.

miento, forma, tamaño, opacidad, mutabilidad, generación y disolución Y quizá éstas se conviertan, a su vez, en los medios para que podamos filosofar mejor acerca de otras y más controvertidas condiciones de las sustancias naturales.[50]

El aristotelismo tradicional enseñaba que se podía conocer la esencia de las sustancias terrestres, pero que la luna y los cuerpos celestes estaban hechos de cierta «quintaesencia», de la cual casi nada podía decir, aparte de que no estaba sujeta a las vicisitudes del cambio. La posición aristotélica revisada admitía que había cambios en el cielo, pero meramente accidentales, como por ejemplo un agrupamiento casual: las estrellitas que se combinaban para crear la impresión de manchas solares. Parecería, por lo tanto, que los escolásticos ajustaron –aunque al precio de una complejidad creciente– los nuevos datos al marco de referencia antiguo. En tanto que el conocimiento esencial quedaba limitado a los objetos al alcance de la mano, el conocimiento accidental llegó a ser posible respecto de algunos objetos distantes, pero sin revelar nada acerca de su naturaleza «real».

Galileo generalmente hace a un lado, por irrelevantes, las categorías aristotélicas. Pone decididamente patas arriba la posición aristotélica y reivindica la validez del conocimiento «accidental» para todo el reino de la naturaleza. En realidad, Galileo sostiene que el conocimiento «esencial» de los aristotélicos es realmente «accidental», puesto que depende enteramente del hecho contingente de que ciertas cosas son más familiares que otras. En otras palabras, las distinciones aristotélicas se apoyan en un error de categorías, en la confusión entre familiaridad operacional y comprensión intelectual. Galileo no veía diferencia básica entre comprender qué es el agua y saber qué son las manchas solares, excepto porque el agua se podía manipular con relativa facilidad, mientras que las manchas solares no se podían manipular directamente. Una vez dicho esto, Galileo procedía a invertir el orden de prioridades. Lo

50. *Ibid.*, pp. 187-188. En esta perspectiva, las tablas de presencia y ausencia se tornaron significativas. La siguiente simplemente tabula los datos que contrasta Galileo.

Estrellas	*Manchas solares*
1. forma regular	forma irregular
2. consistencia de tamaño y forma	siempre inestables y cambiantes
3. permanentes	se forman y se disuelven
4. siempre luminosas	siempre oscuras
5. sin movimiento o con movimiento en un rumbo fijo	movimiento en conjunto, pero cada una afectada por irregularidades
6. dispuestas a distintas distancias desde el sol	contiguas al sol, o imperceptiblemente alejadas de su superficie
7. sólo visibles si están a un lado del sol	sólo visibles si están en línea con el sol
8. probablemente densas y oscuras	rarificadas al modo de las nubes de humo

que abre realmente el camino hacia el conocimiento, es nuestra comprensión de los accidentes: la situación, el movimiento, la forma, el tamaño, la opacidad, la mutabilidad. Estas propiedades medibles, que la vieja filosofía consideraba secundarias, se vuelven fundamentales en la nueva. Galileo no introducía pruebas nuevas; pedía solamente a sus lectores que miraran hechos familiares y bien conocidos desde una nueva perspectiva. Las consecuencias de esta inversión son claras: si la ciencia real y útil se basaba en la aprehensión de propiedades accidentales, entonces nuestro conocimiento de los cuerpos celestes bien podía ser más preciso y mejor fundamentado que gran parte de nuestra comprensión de los fenómenos terrestres. Galileo llevaba este punto hasta el fondo con tres ejemplos de hechos astronómicos seguros: los periodos de los planetas, la esfericidad de la luna y el movimiento de los cuerpos celestes.

No sería justificable descubrir un sentido «operacionalista» en las palabras de Galileo. En verdad, Galileo repudiaba la idea aristotélica de un conocimiento esencial y otro accidental como un mero nominalismo apenas disfrazado. Jamás vaciló en su creencia de que se podía conocer la verdadera constitución del mundo. Combatió contra la filosofía que impedía la posibilidad de descubrir esta constitución real. Abrió el camino a la ciencia al desalojar, no el realismo en sí, sino una versión ingenua del realismo que intentaba canonizar para siempre la ciencia griega y el sentido común medieval.

4

EL DESAFÍO DE LOS COMETAS

En el otoño de 1618, aparecieron tres cometas en rápida sucesión. El último tenía tamaño y brillo poco comunes, y permaneció visible desde noviembre hasta julio del año siguiente. La noticia se recibió (como cualquier novedad celeste, sea un quasar o una estación orbital) con considerable interés, y los amigos de Galileo lo incitaron a engrosar la marea creciente de libros y panfletos que inundaba el mercado astronómico y astrológico. Infortunadamente, Galileo estaba postrado en cama con artritis en ese momento, y era incapaz de hacer observaciones. Sin embargo, nada le impedía especular; y sus admiradores no querían tanto una descripción precisa del tamaño, posición y movimiento del cometa como un pronunciamiento autoritario –un veredicto oracular– acerca de su naturaleza. Sus amigos literarios, que apoyaban a los «modernos» contra los «antiguos» en el debate del momento sobre la poesía, estaban dispuestos, desde luego, a aceptar el «punto de vista moderno» de Galileo, cualquiera que fuese. Sin tener en cuenta los panfletos que aparecían, Galileo seleccionó una conferencia pronunciada por el padre Orazio Grassi, el profesor de matemáticas del Colegio Romano, y publicada anónimamente en 1619. Grassi interpretaba el nuevo cometa en la forma en que Tycho Brahe había explicado el de 1577, y concluía que su pequeño paralaje hacía necesario que estuviera en algún lugar entre el sol y la luna. Su tono era sereno y no decía nada que fuera deliberadamente ofensivo para Galileo, cuyo nombre ni siquiera se mencionaba. Es desconcertante que Galileo seleccionara esta conferencia, tan honesta y sin pretensiones, y le concediera una atención y una crítica especiales. Era, por supuesto, amigo de las polémicas; y es posible que Giovanni Battista Rinuccini haya herido su orgullo cuando le informó que los jesuitas iban a publicar algo sobre el cometa, añadiendo, a continuación, que algunas personas consideraban que eso desacreditaba enteramente al copernicanismo. «Los jesuitas», escribía desde Roma, «estudiaron el cometa en una conferencia pública, ahora impresa, y están firmemente convencidos de que está en los cielos. Alguien, fuera de la orden jesuita, está difundiendo el rumor de que éste es el principal argu-

mento aducido contra el sistema de Copérnico, y de que lo destruye.»[1]

Galileo aprovechó la oportunidad de instruir al respecto a uno de sus discípulos, Mario Guiducci, que había sido recientemente elegido Cónsul de la Academia Florentina y estaba ansioso de dar una impresión favorable haciendo su discurso inaugural sobre el que había llegado a ser un tema habitual de discusión en el mundo ilustrado. Guiducci presentó una serie de tres conferencias que se publicaron, con su nombre, con el título de *Discurso de los cometas*. El manuscrito, examinado por Antonio Favaro, el editor de la Edición Nacional de las Obras de Galileo, está escrito, en gran parte, con la letra de Galileo, y las partes escritas en borrador (o quizás simplemente copiadas) por Guiducci, muestran huellas de revisiones y correcciones del maestro.

Como Guiducci era abogado y no gozaba de reputación científica, resultaba claro, para Grassi, que el verdadero autor era Galileo, y entonces preparó una réplica que se publicó en el otoño de 1619 con el título de *Libra Astronomica ac Philosophica*. Galileo se encolerizó y preparó otra réplica, punto por punto, que completó en 1621, pero sufrió largas demoras, y sólo apareció en 1623. Galileo la dedicó al nuevo papa Urbano VIII, florentino como él y defensor de las humanidades. El *Saggiatore (El ensayador)* es una obra maestra de estilo, y fue aclamada con alborozo, no tanto por los científicos como por las celebridades del mundo literario.

En una época en que asistimos a la desmitificación de los héroes de la revolución científica, los admiradores de Galileo del siglo XX pueden estar seguros de que su prosa se conservará como uno de los más excelentes logros del barroco italiano, y su *Ensayador* como un modelo de ingenio brillante e ironía devastadora. Es en este contexto que algunos historiadores de la ciencia acreditan a Galileo haber establecido, con claridad incomparable, el carácter de su método científico. Aquí se encuentra el iluminado pasaje sobre la naturaleza escrita en el lenguaje de la geometría, y el prodigioso análisis de las sensaciones como sucesos subjetivos en la consciencia y no como cualidades objetivas en los cuerpos percibidos. Grassi sintió que Galileo merecía una respuesta, y a pesar de la oposición de sus superiores religiosos, publicó la *Ratio Ponderum Librae et Simbellae*, en 1626. Galileo, aconsejado por sus amigos toscanos, consideró que la polémica se había prolongado suficientemente. De cualquier modo, en ese momento tenía cosas más importantes que atender: estaba ocupado escribiendo su trabajo más famoso, el *Diálogo acerca de los dos sistemas máximos del mundo*, que completaría en 1632.

---

1. Carta a Galileo, 2 de marzo de 1619, *Opere di Galileo*, vol. XII, p. 443.

1. El discurso de los cometas y la libra

La estructura de la primera parte del *Discurso de los cometas* es típica de los comentarios medievales y renacentistas sobre Aristóteles. Se enumeran las opiniones de los antiguos, registradas en la *Meteorologica*, se estudian las valoraciones de Aristóteles y, finalmente, se presenta la interpretación personal de Galileo.

En la *Meteorologica*, Aristóteles estudia tres teorías acerca de los cometas, y las descarta en favor de una cuarta, suya, que propone.

Según la primera teoría, atribuida a Anaxágoras y a Demócrito, los cometas se consideran grupos de estrellas errantes porque algunas veces se observan estrellas cuando se desintegran los cometas. Aristóteles objeta que la disolución de los cometas no siempre está acompañada por la producción de estrellas y, además, que las estrellas aparecen como puntos indivisibles que, aunque sean numerosos, nunca pueden producir un cuerpo con una extensión continua, como un cometa. Galileo comenta que Aristóteles confunde indivisibilidad con invisibilidad; que no logra, en otras palabras, comprender la distinción entre un punto matemático y un punto físico. Pero aunque la crítica de Aristóteles sea inepta, no por eso quedan reivindicados Anaxágoras y Demócrito, porque a menudo se ven planetas en conjunción sin que aparezca ningún cometa y, además, las conjunciones son demasiado breves para explicar la duración prolongada de los cometas.

Según la segunda teoría, atribuida a algunos pitagóricos y estoicos, los cometas se identifican con planetas que se vuelven visibles cuando se acercan a la tierra, e invisibles cuando se alejan de ella. Aristóteles razona que los cometas no son planetas porque no se mueven dentro de la banda zodiacal, como todos los planetas conocidos. Galileo, cansado de esta clase de argumentos, pregunta: ¿Quién pondrá límites a las estrellas? ¿Quién encerrará las creaciones y maravillas divinas dentro de tan estrechos confines? Su crítica de esta segunda teoría es que los cometas no aumentan de tamaño aparente hasta que alcanzan un máximo, y luego disminuyen al mismo ritmo que los planetas. Son ya grandes cuando aparecen por primera vez, y después de aumentar de tamaño durante un breve período, disminuyen invariablemente durante el resto. Se podía postular una órbita excepcionalmente grande, pero esto no explicaba el considerable cambio de la magnitud aparente del cometa de 1618 en un período de sólo cuarenta días. Además, a fin de dar lugar a semejante cuerpo celeste –que Galileo suponía que no era otro que el cometa de 1577 que volvía en 1618–, el universo debía expandirse enormemente. Su mente retrocede al pensar el tamaño que debería tener el mundo:

> Si se necesitan tantos años para que cumpla una revolución, entonces, en los cuarenta días en que lo vimos no puede haber recorrido siquiera un

> grado entero de su órbita; sin embargo, con su movimiento aparente, ha recorrido más de un cuarto del círculo máximo de la esfera celeste. ¿Cuántos mundos y universos habrá que asignarle como espacio para dar lugar a su revolución completa, si una sola de las cuatrocientas partes de su órbita ocupa la mitad de nuestro universo?[2]

Bien puede preguntar el lector: Y ahora, ¿quién está poniendo límites a la creación de Dios?

Según la tercera teoría, asociada con los nombres de Esquilo e Hipócrates de Cos, se dice que los cometas son planetas que atraen el vapor y la humedad cuando pasan cerca de la tierra. Galileo destaca que esta teoría padece las mismas dificultades que la anterior.

Aristóteles sugiere la hipótesis siguiente. De la tierra emergen exhalaciones calientes y secas y el movimiento del cielo las arrastra. Cuando el movimiento las calienta lo bastante, se enciende, y arden rápidamente –como las estrellas fugaces– o lentamente –como los cometas– cuando una brisa caliente de las regiones más bajas alimenta y aviva el fuego. Galileo considera gratuita esta interpretación:

> Si no me equivoco, el razonamiento de Aristóteles está lleno hasta los bordes de suposiciones que, cuando no son obviamente falsas, están muy necesitadas de prueba; en tanto que debería ser perfectamente evidente lo que se supone en las ciencias *(e pure quel che si suppone nelle scienze, doverebbe esser manifestissimo)*.[3]

Más específicamente, Galileo argumenta, en contra de Aristóteles, que es imposible sostener que un cometa es un cuerpo incandescente y, al mismo tiempo, que se halla bajo la luna, *«por oponerse esto a los pequeños paralajes observados, con extremo cuidado, por tantos excelentes astrónomos»*. Concluye:

> Éstas, oh Académicos, son las más famosas opiniones acerca de los cometas que hasta ahora han llegado a mis manos. Entre ellas, acepto como sumamente probable la idea de los pitagóricos de que un cometa es una refracción de nuestra visión del sol; yo consideraba que su situación, muy alta sobre la luna, había sido definitivamente demostrada por los astrónomos, cuando nuevas cuestiones sugeridas por nuestro frecuentemente citado Académico me condujeron a ulteriores dudas y dificultades.[4]

Estas dudas surgen de la consideración del uso del paralaje que hace Tycho Brahe para determinar la altura de los cometas.

---

2. Galileo [y Mario Guiducci], *Discorso delle comete* (Florencia, 1619), *ibid.*, Vol. VI, p. 51.
3. *Ibid.*, p. 53, cursivas del autor.
4. *Ibid.*, pp. 63-64.

La relevancia del paralaje

El fenómeno del paralaje se refiere al cambio de visión que ocurre cuando se ve el mismo objeto desde posiciones diferentes. Por ejemplo, si se sostiene un lápiz en frente de la cara y se lo mira con un ojo cerrado, cuando se cierra el otro ojo, parece que el lápiz se ha movido. A mayor distancia del lápiz, menor es el cambio o paralaje. Cuando se observa la luna desde dos puntos de la superficie de la tierra, se advierte un desplazamiento paraláctico, pequeño pero indudable, sobre el fondo de las estrellas distantes. Como el cometa de 1577 mostraba un paralaje mucho más pequeño, Tycho Brahe infería que estaba por encima de la luna.

Galileo reconoce que el desplazamiento paraláctico es un método acreditado para establecer distancias, pero sostiene que ha sido usado indiscriminadamente limitando su utilidad a una clase particular de cuerpos.

> Los objetos visibles son de dos clases: los primeros son verdaderos, reales, únicos e inmóviles, en tanto que los otros son meras apariencias, reflejos de la luz, imágenes y simulacros errantes. Tanto dependen para su existencia de la visión del observador que no sólo cambian de posición cuando él lo hace, sino que creo además que desaparecerían por completo si él perdiera su visión.[5]

Por lo tanto, el paralaje se puede usar para determinar la distancia de los objetos reales pero no de los halos, los parhelios o el arco iris. Galileo pone los cometas en esta última categoría y los compara con los dardos de luz solar que se filtran por los huecos entre las nubes a la puesta del sol, y con las largas franjas luminosas que se extienden entre un observador situado en la costa y el sol que se pone en el mar. Esta última comparación es particularmente importante: será la analogía clave de Galileo:

> En este caso, el sol está encima, y la superficie del mar debajo, pero si imaginamos que el sol está debajo del horizonte, y alguna otra superficie que no fuera la del mar se elevara por encima de él, percibiríamos en ella un reflejo similar al de la luz solar, mientras todo el resto permanecería indiferenciado del cielo mismo, puesto que incluso la superficie del mar está a veces tan confundida con el cielo que ninguna distinción puede advertirse.[6]

Galileo insiste en que quienes quieran utilizar el desplazamiento paraláctico para determinar la posición de un cometa, deben saber primero si es un cuerpo físico o un fenómeno óptico. De este modo, pone en ma-

5. *Ibid.*, pp. 65-66.
6. *Ibid.*, p. 69.

nos de sus adversarios el peso de la prueba, considerándose luego libre de sugerir que los cometas son simplemente la refracción de la luz solar en los vapores que se elevan de la tierra.

El tamaño del cometa

En su conferencia, Grassi observaba casualmente que el telescopio aumentaba en mayor medida los objetos cercanos que los distantes. Galileo lo refuta con la ayuda de tres experimentos. En primer lugar, se observan dos estrellas vecinas por el tubo vacío del telescopio, de tal manera que ocupen exactamente el diámetro visual. Cuando se insertan las lentes, se debe mover el telescopio para pasar de una estrella a la otra, lo cual no sería necesario si los objetos muy lejanos no se agrandaran. En segundo lugar, se coloca un círculo negro a cierta distancia del observador, y un círculo blanco varias veces más lejos en la misma dirección, de manera que el negro no lo cubra totalmente, sino que deje un reborde blanco visible. Cuando se observa a través del telescopio, esta distribución se mantiene inalterable: si el círculo negro estuviese más aumentado que el blanco, el reborde blanco ya no sería visible. En tercer lugar, un eclipse de sol observado a ojo desnudo no se diferencia del mismo eclipse visto a través del telescopio. Sin embargo, según la teoría de Grassi, se podría esperar que el eclipse, observado a través del telescopio, fuera total.

No obstante, la refutación de Galileo a Grassi no implica una clara comprensión de las propiedades de las lentes. Confunde el aumento de tamaño con la formación de una imagen ligeramente fuera de foco, como se ve en el pasaje siguiente: «Prepara un telescopio para ver algunos objetos ubicados a una distancia de novecientos brazos y, sin mover el telescopio, alarga el tubo una o dos pulgadas. Se verá inmediatamente un aumento considerable del objeto».[7]

No se debe olvidar que Grassi podía apoyar su posición con la evidencia experimental: las estrellas observadas con el telescopio parecían muy poco más grandes que sin él. Galileo intenta objetar esto cuando sostiene que la irradiación no es una propiedad física de las estrellas sino el resultado de la refracción a través de la humedad de la pupila. Alega como prueba que cerrar y apretar los párpados hace que los rayos parezcan más grandes, y que las personas con ojos lacrimosos ven más irradiación que otras.

> Tales son nuestras experiencias, y tales las conclusiones que se deducen de los principios y causas de la ciencia de la óptica *(prospettiva)*. Si nuestras

7. *Ibid.*, p. 83.

> conclusiones y experiencias son falsas y defectuosas, entonces nuestros fundamentos serán débiles. Pero si los nuestros son verídicos, y falsos los de ellos, deberán aceptar que podemos dudar de la solidez de los fundamentos de sus propios principios.[8]

Grassi se apresuró a señalar en su *Libra* que si la causa de los rayos fuera la refracción en la superficie del ojo, el telescopio no produciría ninguna diferencia. Es un argumento convincente, y los conocimientos ópticos de Galileo son demasiado inmaduros para que pueda ofrecer una réplica adecuada. En su lugar, cambia inteligentemente de terreno:

> Exactamente lo mismo ocurre con los objetos visto a través del telescopio que con los vistos sin él. Por ejemplo, el disco de Júpiter, visto a ojo desnudo, es tan pequeño que se pierde en la amplitud de su propia irradiación; pero no el disco de la luna, porque ocupa en nuestra pupila mucho mayor espacio que su círculo de irradiación, y en consecuencia lo vemos calvo y no velludo.[9]

Por lo tanto, la respuesta de Galileo es que se debe agrandar Júpiter para liberarlo de la irradiación accidental, pero que la luna es siempre bastante grande para ser vista sin ella. Es una respuesta ingeniosa, pero el interrogante se mantiene en su totalidad con respecto a las estrellas que, manifiestamente, no se ven aumentadas. La causa principal, como sabemos hoy, es que la luz de una estrella llega hasta nosotros como un punto luminoso, al que un telescopio, especialmente uno imperfecto, puede dar la apariencia de un disco. No hay aumento: simplemente, no se logra focalizar un punto preciso. Pero cuando se afecta un área importante de la retina, se reducen los efectos de la irradiación y el parpadeo. Galileo no lo sabía; atribuía la irradiación a lentes defectuosas, y suponía que eran perfectos los telescopios que mostraban las estrellas como cuerpos redondos.

El movimiento del cometa

El tema esencial en el debate sobre los cometas es el problema de su movimiento. El famoso cometa de 1577 parecía moverse veinte veces más rápido cuando apareció por primera vez que cuando desapareció. Tycho Brahe intentó reducir a la uniformidad este movimiento irregular haciendo que el cometa girara alrededor del sol, pero en su empresa cometió lo que Galileo consideraba una violación metodológica.

---

8. *Ibid.*, p. 85.
9. Galileo, *Il Saggiatore* (Roma, 1623), *Opere di Galileo*, Vol. VI, p. 362.

> Aunque Tycho se esfuerza por reducir el movimiento a la uniformidad, asignando a los cometas una órbita alrededor del sol, no puede ocultar la verdad tan completamente como para no confesar que debe atribuirle un movimiento irregular incluso dentro de su propia órbita. Hasta se dejaría llevar a ponerlo en una órbita no circular. Disimulando (para satisfacer su nueva fantasía) que una de las razones principales por las cuales Copérnico y él mismo han abandonado el sistema de Ptolomeo es la imposibilidad de salvar las apariencias por medio de movimientos perfectamente circulares y uniformes en sus propias órbitas y alrededor de sus propios centros. También pretende otra extravagancia no menor: aunque es evidente en todos los sistemas que todos los planetas se mueven en la misma dirección, introduce una órbita destinada solamente a los cometas y que se mueve en la dirección opuesta, cosa verdaderamente improbabilísima.[10]

Por lo tanto, Tycho pecaba contra dos aspectos básicos de la ciencia de Galileo: el principio de la circularidad y el principio de la simplicidad. Como interpretación alternativa, Galileo sugirió que el cometa era simplemente un fenómeno de refracción, no muy distinto de una aurora boreal:

> Según creo, este efecto no tiene otro origen que éste: una parte del aire vaporoso que circunda la tierra está por alguna razón inusitadamente rarificado; y por estar de modo tan extraordinario sublimado, asciende sobre el cono de la sombra terrestre, de modo que el sol hiere su parte superior, reflejando así su esplendor y formando la aurora boreal.[11]

Añade que las manchas solares demuestran la presencia de zonas de vapor errante en el cielo, y que justamente antes de que aparecieran los cometas, la región oriental del cielo estaba inusitadamente cubierta por vapores luminosos.

Galileo afirma que el simple movimiento en línea recta explica las cuatro observaciones básicas acerca del cometa: primero, parecía moverse en línea recta; segundo, disminuía su velocidad continuamente, como si huyera hacia adelante; tercero, disminuía de tamaño; y finalmente, parecía alejarse del sol. Explica su punto de vista con la ayuda de la figura 9.

Supongamos que ABC es el globo terrestre, con un observador situado en A; que AG es la línea del horizonte; y que la línea recta DF es el curso del cometa, que recorre los segmentos iguales $SO = ON = NI = IF$. Para el observador en A, será inmediatamente obvio que la velocidad y el tamaño del cometa parecen disminuir progresivamente a medida que se mueve de O a F.

---

10. Galileo, *Discorso delle comete, Opere di Galileo*, Vol. VI, pp. 88-89.
11. *Ibid.*, p. 94

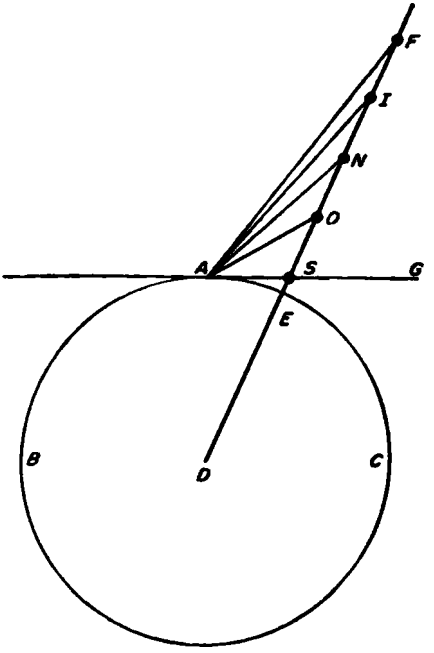


FIGURA 9

El movimiento vertical rectilíneo es matemáticamente claro y económico, pero implica también una consecuencia que no se puede evitar: si el cometa se hubiese movido en línea recta perpendicularmente a la superficie de la tierra, siempre habría parecido que se movía hacia el cenit. Como esto se contradice con los datos de la observación, la argumentación de Galileo se derrumba por completo, como él mismo se ve obligado a reconocer:

> No pretenderé ignorar en este punto que si la materia que configura el cometa tuviese otro movimiento que el recto y perpendicular a la superficie del globo terrestre, es decir, del centro al cielo, el cometa parecería para nosotros dirigirse precisamente hacia el cenit; pero, en realidad, esto no fue así, sino que declinaba hacia el norte. Esto nos obliga o bien a alterar lo que hasta aquí se ha dicho, aun cuando ello correspondía a las apariencias en muchos casos, o bien a mantener lo dicho, agregando alguna otra causa para esa aparente desviación. No sabría hacer lo primero ni me agradaría hacer lo segundo.[12]

12. *Ibid.*, p. 98. Giovanni Battista Baliani observaba que Galileo estaba atrapado entre

La navaja de Ockam se vuelve una espada de doble filo: corta de raíz las suposiciones injustificadas de Aristóteles, pero también la gratuita cadena de razonamiento de Galileo.

Esto pone a Galileo en un serie aprieto pero, en lugar de enfrentarlo, pasa de inmediato a impugnar la explicación de Tycho Brahe sobre la cola del cometa, que Galileo considera equivocada porque Tycho sugería que las líneas rectas pueden parecer curvadas: «Acerca de la cola, no encuentro que alguien haya escrito algo, excepto Tycho, y él, me parece, no lo ha hecho más correctamente que sobre otros particulares que dependen de la conjetura humana. Por lo tanto, examinaré lo que ha escrito y, como esto sin duda se revelará inconcluyente, trataré de producir algo plausible».[13] La interpretación de Galileo es que los vapores de la atmósfera refractan la luz como una lente plano-convexa.

> En nuestro caso, como el ojo no esté en el centro del orbe vaporoso, el cometa, que en si mismo es realmente recto, jamás lo parecerá para nosotros, excepto cuando se extiende por un plano que pasa por nuestros ojos y por el centro de los vapores; esto es lo mismo que hallarse en uno de nuestros círculos verticales. Pero cuando los corte, siempre lo veremos más o menos curvado, según incida más o menos transversalmente.[14]

Este pasaje suscita dos problemas. En primer lugar, ¿cómo puede afirmar Galileo que el cometa es realmente recto cuando ya ha admitido que en ese caso debería dirigirse siempre hacia el cenit? Pisotea el problema introduciendo la idea de refracción, pero entonces, y aquí está el segundo problema; si el vapor atmosférico actúa como una lente de los rayos solares, también debe desviar la luz que llega de otros cuerpos celestes, lo que no ocurre. Y si, como sugiere Galileo, los rayos del sol responsables de la producción de los cometas son más refractados cerca del horizonte que del cenit, la disposición de las estrellas en las constelaciones cambiaría considerablemente cuando se mueven del cenit al horizonte, y esto no se observa.

La Libra Astronomica

En vista de estas debilidades de la posición de Galileo, la reacción a

---

los cuernos de un dilema. Por una parte, si *AE* (ver figura 9) es pequeña, entonces el cometa en *S* estaba muy cerca de la tierra y, por lo tanto, debía haber disminuido de tamaño mucho más de lo observado mientras ascendía hacia *F*. Y si *AE* era grande, el cometa para describir el gran ángulo observado *FAS*, debía haber ascendido a una altura muy superior a la que Galileo estaba dispuesto a aceptar (carta a Galileo, 8 de agosto de 1619, *ibid.*, Vol. XII, p. 477).

13. *Ibid.*, p. 98.

14. *Ibid.*, p. 102.

su discurso fue rápida. A fines de 1619, Grassi publicó su *Libra*, en la que se proponía pesar las opiniones de Galileo. En consideración a sus superiores religiosos, siempre temerosos de que sus súbditos se enredasen en controversias públicas, Grassi ocultó su autoría bajo el seudónimo de Lothario Sarsi Sigensani, anagrama de Horatio Grassi Savonense, y haciéndose pasar por uno de sus propios alumnos.[15] Negaba seguir a Tycho, excepto en la aplicación del método del paralaje, pero añadía de modo bastante significativo:

> Concedamos que mi maestro haya seguido a Tycho. ¿Es un crimen tan grande? ¿A quién debía seguir en su lugar? ¿A Ptolomeo, cuyos seguidores tienen el cuello amenazado por la espada desenvainada de Marte, ahora más próxima? ¿A Copérnico? Pero él, que es piadoso, más bien alejará de sí a todos y despreciará y rechazará su propia hipótesis, recientemente condenada. Por lo tanto, Tycho sigue siendo el único a quien podemos considerar nuestro conductor entre los desconocidos cursos de las estrellas.[16]

Éste es un buen ejemplo de cómo el Decreto de 1616, que prohibía la teoría heliocéntrica, inhibía y viciaba la discusión científica. Era un instrumento demasiado conveniente para no usarlo, especialmente contra un adversario capaz de lanzar un duro ataque. La referencia de Grassi a la condena de Copérnico constituyó un antecedente infortunado que las mentes mezquinas, desde luego, se deleitarían en aprovechar. Esto es particularmente lamentable por el hecho de que esa crítica a Galileo era en general aguda y acertada. Advirtió rápidamente las contradicciones de Galileo y lo criticó porque desacreditaba el paralaje y luego lo usaba contra los aristotélicos,[17] y porque admitía que su teoría era incorrecta y luego la mantenía a pesar de las contradicciones. Recordaba a Galileo que también Kepler había intentado explicar el curso de los cometas mediante la línea recta, sin éxito. Pero le reprochaba, principalmente, su afirmación de que los cometas eran meras refracciones en el vapor atmosférico.

---

15. Grassi no ocultó su identidad a los amigos romanos de Galileo. Giovanni Ciampoli informó a Galileo que «El P. Grassi, un jesuita que ha regresado hace poco de Perugia, trajo esta tarde su *Discurso* sobre los cometas... Me dijo que presentaba sus argumentos lo mejor que podía, pero que siempre hablaba de usted con respeto» (carta a Galileo, 18 de octubre de 1619, *Ibid.*, Vol. XII, p. 494).

16. Orazio Grassi, *Libra astronomica ac philosophica* (Perugia, 1619) *ibid.*, Vol. VI, p. 116. Según Ptolomeo, Marte cortaba el curso del sol. Generalmente, esto era reconocido como un serio defecto del sistema ptolemaico.

17. *Ibid.*, p. 118. Giovanni Remo observaba la misma contradicción en su carta a Galileo del 24 de agosto de 1619 (*ibid.*, Vol. XII, p. 485)

La naturaleza de los cometas

Grassi exhibió un impresionante ejército de argumentos para demostrar que los vapores no podían explicar la apariencia y el movimiento de los cometas. En primer lugar, los vapores debían estar dotados de propiedades contradictorias: debían ser opacos para reflejar la luz y, al mismo tiempo, transparentes para que las estrelas titilaran a través, sin sufrir refracción aparente. En segundo lugar, el reflejo del sol sobre la superficie del mar, y el arco iris, que Galileo usaba como modelos de los cometas, siguen el movimiento del sol, y los cometas no lo siguen.[18] En tercer lugar, dado el gran espacio ocupado por el vapor, el cometa debería haber aparecido como un círculo o un segmento de círculo, como se puede ver con la ayuda de la figura 10.

Supongamos que el sol está en *I*; el punto de observación, en *D*; y el cometa, en *A*. Se unen *ID* y *DA*, y se prolonga *ID* hasta *H*.

El ángulo *IDA* será el ángulo en el que aparece el cometa. Rotamos el ángulo *IDA* sobre el eje *ID* para producir el círculo *BAC*. Puesto que cualquier punto de este segmento formará con *I* y *D* un ángulo igual al ángulo *IDA*, el cometa debería aparecer como un círculo o segmento de círculo precisamente por la misma razón que el arco iris presenta esa apariencia.

La «solución económica» galileana del movimiento rectilíneo estaba sujeta al mismo y revelador análisis. Si los vapores ascienden desde el ecuador, donde la evaporación es presumiblemente mayor que en cualquier otro lugar, Grassi preguntaba cómo podían moverse hacia el norte los cometas ya que Galileo había descartado la rotación de las esferas celestes que podían arrastrarlos. Además, según la hipótesis de Galileo, la velocidad aparente del cometa debía disminuir proporcionalmente al ángulo trazado (ver figura 9). Pero la realidad era distinta: durante los primeros días, la velocidad del cometa había sido casi constante. Ni siquiera la teoría heliocéntrica ayudaba; durante los cuarenta días que el cometa fue visible, la tierra sólo podía haber recorrido 3°, distancia insuficiente para explicar el movimiento del cometa. Por lo tanto, a Grassi le parecía que, tanto dentro del marco de referencia de la nueva astronomía como de la vieja, la hipótesis de Galileo no lograba salvar ni siquiera «las apariencias».

---

18. *Ibid.*, pp. 140-142. Giovanni Battista Baliani observaba acertadamente en su carta a Galileo del 8 de agosto de 1619: «No puedo comprender cómo usa usted esto para determinar qué es un cometa, porque esta franja luminosa sobre el mar se extiende siempre y necesariamente sobre la recta entre nuestro ojos y el sol... Ahora bien: no sólo la cola sino el cometa mismo, sólo accidentalmente aparecen en una recta entre nosotros y el sol. Por lo tanto, el cometa no se puede producir de la misma manera que una franja luminosa sobre la superficie del mar» (*ibid.*, Vol. XII, p. 477).

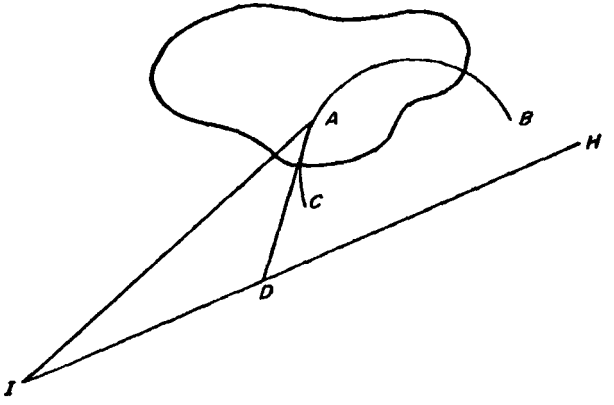


FIGURA 10

II. EL ATAQUE A TYCHO

Los debates sobre los cometas de 1618 no demostraron avances significativos en su visión de los fenómenos cósmicos. La posición que mantenía –en nombre del progreso– era la del aristotelismo decadente. Es el punto de vista de hombres como Giulio Cesare Lagalla, el venerable profesor distraído de la Sapienza, a quien los jóvenes jesuitas del Colegio Romano ridiculizaban porque había tomado el humo de una hoguera en las afueras de Roma por un nuevo cometa.[19]

Tycho Brahe había reivindicado la realidad de los cometas y la utilidad del paralaje para determinar sus distancias. Galileo no se mostraba inclinado a reconocer a Tycho sus notables logros.[20] La amenaza que el sistema astronómico de Tycho constituía para su propia teoría era probablemente la causa. Galileo no estaba dispuesto a admitirlo, pero difícilmente podía ignorar que sus adversarios más competentes ya no eran discípulos de Ptolomeo sino seguidores del astrónomo danés. G. B. Ba-

19. Lagalla escribía a Galileo para expresar su aprobación del *Discurso de los cometas*: «Confirma la opinión que siempre he mantenido... los cometas no son exhalaciones ígneas, sino refracciones de la luz solar en los vapores y en algunas partes más densas de los cielos». Él mismo detallaba cómo los jesuitas afirmaban que el cometa que decía haber observado era sólo el «humo de una hoguera en las afueras de la Porta d'Cavalliggieri» (carta a Galileo, 21 de diciembre de 1619, *ibid.*, pp. 500-501).

20. En *El ensayador*, Galileo elogiaba el *Anti-Tycho* de Scipione Chiaramonti (Venecia, 1621), antes de leerlo, porque suponía que era una refutación de Tycho, a la luz del sistema de Copérnico (*ibid.*, Vol. VI, p. 231). Cuando leyó posteriormente la obra, se sintió dolorosamente defraudado, y la escogió para vituperarla en su *Diálogo acerca de los dos sistemas máximos del mundo* (*ibid.*, Vol. VII, p. 77)

liani llegó a escribir que los descubrimientos astronómicos de Galileo tendían a «probar la fluidez de la materia celeste y, de este modo, a hacer más probable la hipótesis de Tycho».[21] Galileo se apresura a desvirtuar esta impresión:

> Con la hipótesis de Tycho, me quedan las enormes dificultades que me obligaron a abandonar a Ptolomeo; en tanto que en Copérnico no hay una sola cosa que me deje la menor duda, y aún menos en cuanto a las objeciones contra el movimiento de la tierra que Tycho formula en algunas de sus cartas.[22]

La afirmación de Galileo de que «en Copérnico, no hay una sola cosa que me deje la menor duda» no debería tomarse como una verdad literal; y se debería descontar el inflado lenguaje de la propaganda. Pero la referencia a las objeciones de Tycho Brahe, y su rechazo por infundadas, suscitan una pregunta interesante: ¿pensaba Galileo en las cartas de otros corresponsales aparte de Baliani? Ya en 1611, Giovanni Lodovico Ramponi expresaba la esperanza de que encontraría, en el próximo libro de Galileo (el *Sistema Mundi* prometido en el *Sidereus Nuncius*),

> la respuesta a un problema que, a mi modo de ver, deberían resolver quienes sostienen la hipótesis de Copérnico, u otra similar. Es el problema que más contribuyó a que Tycho abandonara esa hipótesis: los cometas se habían visto en oposición al sol, pero no lo bastante distantes (como las estrellas fijas) como para no estar expuestos a él, como dice Galileo en el primer libro de las *Cartas*, página 149... si esto fuera cierto, como sus observaciones exactas son convincentes, *particularmente en el caso del paralaje*, me parece que la hipótesis copernicana se derrumbará si no se encuentra alguna otra forma de salvar las apariencias.[23]

Tycho no sospechaba que los cometas se movían en curvas parabólicas que se diferenciaban enormemente de las órbitas de los planetas, y daba por sentado que seguían un curso circular alrededor del sol. A la luz de esta suposición, deducía que si la tierra también giraba alrededor del sol, los cometas mostrarían las estaciones y retrogresiones observadas en los

---

21. Carta a Galileo, 31 de enero de 1614, *ibid.*, Vol. XII, p. 21.
22. Carta a G. B. Baliani, 12 de marzo de 1614, *ibid.*, p. 35.
23. Carta a Galileo, 23 de julio de 1611, *ibid.*, Vol. XI, pp. 161-162, cursivas del autor. La referencia es a los *Epistolarum astronomicarum libri* de Tycho Brahe (Uraniborg, 1596), en *Scripta Astronomica* de Tycho Brahe, ed. I. L. E. Dreyer, 14 volúmenes e índice (Copenhague, 1913-1929), Vol. V, p. 179. Probablemente, Galileo no respondió porque encontramos que, el año siguiente, Ramponi repetía su pregunta «sobre la solución del problema de los cometas en oposición al sol, que había tenido fuerza suficiente para desalojar la hipótesis copernicana de la mente de Tycho» (carta a Galileo, 21 de mayo de 1612, *Opere di Galileo*, Vol. XI, p. 300).

planetas. Sin embargo, cuando los cometas estuvieran en oposición, no se moverían en una dirección retrógrada como los demás planetas.

Esto reforzó la creencia de que la tierra era fija, y Tycho creó un nuevo sistema astronómico que reemplazaba tanto el modelo ptolemaico como el copernicano.

Por esta razón, el problema de los cometas debía ser tema importante en el gran tratado astronómico que Galileo se proponía escribir pero continuaba postergando. Si los cometas eran reales, su curso en el espacio era un desafío al copernicanismo. La dificultad se podía resolver, por supuesto, postulando una órbita no circular; pero Galileo estaba enérgicamente en contra de esta idea. Prefería negar la existencia del cometa y reducirlo a un fenómeno óptico, a una refracción en los vapores que ascienden de la tierra. Era probable que esta débil explicación fuera aceptada si él no podía demostrar que Tycho estaba completamente equivocado en sus afirmaciones acerca de los cometas. Intentó hacerlo atacando a Tycho en varios frentes y usando su consumada capacidad polémica para arruinar el prestigio de Tycho. El temor a un peligroso rival hizo de Galileo un crítico sesgado, y uno se pregunta si, en el calor del debate, creía posible desalojar el cometa del cielo destruyendo la reputación de Tycho en la tierra. Lo criticaba por abandonar el ideal superior de la circularidad y por aceptar que el cometa se moviera a velocidad irregular en un curso no circular, en una dirección opuesta a la de otros planetas, pero escamoteaba el fracaso de su propio intento por explicar la marcha del cometa mediante un movimiento rectilíneo. Lamentaba que Tycho no hubiese producido la obra astronómica prometida, pero no mencionaba que habían pasado nueve años desde que él mismo anunciara, en 1610, su intención de escribir un tratado sobre el sistema del mundo. Recriminaba a Tycho por pensar que todos los anteriores astrónomos podían haberse equivocado, «quizás porque no poseían instrumentos tan caros como los de él». Sin embargo, unas pocas páginas antes, en el mismo *Discurso de los cometas*, había apelado a «las explicaciones más precisas de Tycho y otros» para apoyar su afirmación de que los cometas habitualmente se alejaban del sol.[24]

Galileo prosiguió su ataque en *El ensayador*, donde intentó demostrar que Tycho «necesitaba aprender los primeros elementos de matemáticas», porque había supuesto que los rayos que se extendían desde una estrella hasta los extremos de una cuerda terrestre que unía Uraniborg y Praga, eran paralelos. En realidad, la crítica de Galileo era justificada, pero en el contexto de los argumentos de Tycho, esa sutileza geométrica era irrelevante, como Kepler se lo recordó amablemente.[25]

---

24. Galileo, *Discorso delle comete*, *Opere di Galileo*, Vol. VI, pp. 102-103 y 92.

25. *Ibid.*, p. 229. Ver *De mundi aetherei recentioribus phaenomenis liber secundus* de Tycho Brahe (Uraniborg, 1588), en *Scripta Astronomica*, Vol. IV, pp. 107-112. Original-

El precio de la controversia

Galileo tuvo que pagar el precio de esa ofensiva general contra el astrónomo más grande de su época. Su negativa a considerar los cometas como cuerpos reales le adjudicó el papel de un aristotélico conservador, y su explicación de la naturaleza de los cometas por la refracción, lo condujo a multitud de contradicciones: usaba el método del paralaje contra Aristóteles, lo descartaba, y luego lo retomaba para probar que los cometas estaban por encima de los relámpagos; no lograba comprender que su teoría de la refracción exigía que la disposición de las estrellas de una constelación debía alterarse cuando se acercaba al horizonte; demostraba que la posición del sol determinaba la aparición de arco iris, halos y parhelios, que él comparaba a los cometas, pero omitía explicar de qué modo el movimiento del sol generaba el curso aparente del cometa, que era el punto en cuestión. Galileo suponía también que los vapores podían ascender a gran altura, y cuando Grassi objetó que fuertes vientos desviarían los vapores, replicó: «Estas razones son inútiles puesto que la fluctuación de los vientos no alcanza ni sobrepasa la altura de algunas montañas». Sin embargo, tres años antes, en su *Discurso acerca de las mareas*, los vientos alisios le habían servido para demostrar la rotación diaria de la tierra sobre su eje, lo que implicaba que podía haber vientos fuertes en la cima de las montañas.[26]

Galileo no aceptaba la posibilidad de órbitas no circulares, ni estaba dispuesto a considerar un aumento del tamaño del universo. Esta última negativa significaba que se adhería a la idea de un mundo bastante pequeño para que el desplazamiento paraláctico de las estrellas distantes fuera perceptible si la tierra realmente se movía. Absorto en refutar a Tycho, no advirtió que defendía un mundo donde no había espacio para la teoría heliocéntrica, porque si las estrellas no estaban a enorme distancia, la ausencia de paralaje anual se tornaba una poderosa justificación de la inmovilidad de la tierra.

III. El problema del método

Los escritos de Grassi demostraban que era superior a Galileo en erudición, pero era un hombre encadenado por esa erudición y nada dispuesto a dudar de sus fuentes si estaban consagradas por el tiempo. Muy

---

mente esta crítica fue dirigida a Tycho por Scipione Chiaramonti en su *Anti-Tycho* (Venecia, 1621), pp. 218-219. La observación de Kepler aparece en su *Tychonis Brahi Dani Hyperaspiates*, en Kepler, *Gesammelte Werke*, ed. F. Hammer *et al.*, 18 volúmenes hasta la fecha (ed. C. H. Beck, Munich, 1938), Vol. VIII, pp. 413-414.

26. Apostilla de Galileo a la *Libra* de Grassi, *Opere di Galileo*, Vol. VI, p. 136, apostilla 78; *idem*, *Discorso del flusso e reflusso del mare*, *ibid.*, Vol. V, pp. 393-394

versado en lógica tradicional, se complacía en modelar sus resultados en forma silogística. Galileo lo trataba con feroz desdén porque había criticado la imprecisa terminología del *Discurso de los cometas*, y porque intentaba resolver con argumentos lógicos problemas que sólo se podían resolver mediante la evidencia empírica y el conocimiento de la óptica.

La actitud de Galileo nos da una clave de la influencia del movimiento originado en el círculo de los *letterae humaniores* sobre el nacimiento de la ciencia moderna. Galileo no era discípulo de los lógicos paduanos, sino seguidor de los humanistas florentinos, que se rebelaban contra la jerga escolástica.[27] Su desprecio por las distinciones escolásticas tuvo un efecto liberador y a la vez permisivo sobre la cultura de la época. Abría paso al pensamiento libre y a la investigación original, pero también facilitaba que la retórica pasara por argumento racional. Por ejemplo, cuando Virginio Cesarini, uno de los amigos literarios de Galileo, oponía «los obstinados amantes y adoradores de las cosas viejas» a las «mentes que tienen el coraje de considerar nuevas ideas», la novedad parecía un valor en sí misma.[28] Lo que elevaba a Galileo por encima de la multitud de escritores que lamentaban la mentalidad literal de los aristotélicos era su fe en las matemáticas, y su dedicación a ellas. En esto radicaba su originalidad.

El libro de la naturaleza

Juzgados por las normas de principios del siglo XVII, Grassi y Galileo eran ambos matemáticos de primera clase; pero Galileo era más radical en su adhesión al método matemático. Grassi usaba las matemáticas como una herramienta conveniente; Galileo equiparaba la comprensión de la naturaleza de la realidad física con el conocimiento de su estructura geométrica. En el esbozo autobiográfico del comienzo de *El ensayador*, Galileo evoca los ataques contra su *Discurso acerca de los cuerpos flotantes* con palabras que no nos permiten dudar de su convicción de que las matemáticas eran el camino al conocimiento verdadero y seguro:

> He puesto en el papel todo lo que se me ha ocurrido más allá de las enseñanzas de Arquímedes, que es tal vez tanto como puede decirse veridicamente sobre el tema. Y he aquí que de inmediato, todas las prensas se han

27. Para una interpretación diferente, ver John Herman Randall Jr., *The School of Padua and the Emergence of Modern Science* (ed. Antenore, Padua, 1961). Randall establece que los lógicos paduanos estaban interesados en la lógica de la ciencia general, pero no logra probar que influyeran sobre Galileo o que su definición de la ciencia pudiera medirse con la de Galileo.

28. Carta a Galileo, 7 de mayo de 1622, *Opere di Galileo*, Vol. XIII, p. 88.

> llenado de invectivas contra mi *Discurso*. Sin la menor consideración por el hecho de que todo lo que escribí estaba confirmado y sostenido por demostraciones geométricas, se han refutado mis opiniones; y no se ha advertido –tanta fuerza tiene la pasión– que contradecir la geometría es negar abiertamente la verdad.[29]

Galileo ampliaba este punto en el famoso pasaje del «libro de la naturaleza», que comenzaba con una burla al respecto de Grassi por la autoridad:

> Me parece advertir en Sarsi la firme creencia de que es esencial, en filosofía, apoyarse en la opinión de algún autor famoso, como si nuestras mentes, cuando no están casadas con el razonamiento de algún otro, debieran permanecer completamente baldías y estériles. Quizá entiende que la filosofía es un libro de ficción creado por un solo hombre, como la *Ilíada* o el *Orlando Furioso;* libros donde lo menos importante es que lo escrito en ellos sea verdad. Sig. Sarsi, no es así como son las cosas.
>
> La filosofía está escrita en ese grandísimo libro que está siempre abierto ante nuestros ojos (me refiero al universo), pero no se puede leer si antes no se aprende a conocer los caracteres y el lenguaje en que está escrito. Ese libro está escrito en lenguaje matemático, y sus caracteres son los triángulos, los círculos y otras figuras geométricas, sin cuya ayuda es humanamente imposible comprender de él una sola palabra, y sólo se puede vagar vanamente por un oscuro laberinto.[30]

Esta veneración por la geometría ayuda a comprender la reiteración del tema «platónico» de la circularidad en los escritos de Galileo. La geometría sólo se puede expresar en el lenguaje de las formas regulares, entre las cuales el círculo ocupa una posición destacada, pero de ningún modo exclusiva. Galileo, acusado por Grassi de otorgar al círculo un status ontológico único, respondió:

> No soy yo quien quiere que el cielo, por ser un cuerpo nobilísimo, tenga una forma nobilísima, como la esfera perfecta; es el mismo Aristotéles contra quien el Sig. Mario argumenta *ad hominem*. En cuanto a mí, como jamás he leído las crónicas ni los particulares títulos de nobleza de las formas, no sé cuáles son más o menos nobles, ni cuáles más o menos perfectas. Creo que todas ellas son de algún modo antiguas y nobles; o para decirlo mejor, que en sí mismas no son nobles y perfectas ni innobles e imperfectas, excepto en la medida en que para construir paredes la forma rectangular es más perfecta que la esférica, y que para rodar o mover carros considero más perfecta la circular que la triangular.[31]

29. Galileo, *Il Saggiatore*, *ibid.*, Vol. VI, p. 214.
30. *Ibid.*, p. 232.
31. *Ibid.*, p. 319.

Cuando Grassi replicó débilmente que en la narración bíblica de la creación el cielo y la tierra habían recibido la forma circular, Galileo dijo:

> La esfera, el cubo, la pirámide, etc., son igualmente eternas y anteriores a la creación del cielo y la tierra y, por lo tanto, en este sentido, igualmente nobles.[32]

Una auténtica conclusión científica debía ser absolutamente cierta porque expresaba la verdad eterna de la estructura matemática del universo. Esto no quería decir que no hubiera lugar para las hipótesis aproximativas en ciencia; por el contrario, implicaba que muchas teorías eran meramente provisionales. Los escolásticos hacían demasiadas afirmaciones porque sustentaban sus argumentos en las cualidades subjetivas en lugar de razonar a partir de la estructura geométrica objetiva de la materia. Galileo estaba totalmente convencido de que la naturaleza estaba geométricamente estructurada, pero consideraba que el predominio de una estructura particular, en cada caso, debía estudiarse mediante el análisis matemático y la confirmación empírica. En las mejores condiciones, era una tarea difícil, y jamás podía ser grande el número de conclusiones seguras.

La mente de Galileo se debatía entre la certeza de las demostraciones geométricas y su conciencia del carácter hipotético de sus propias especulaciones. Por una parte, insistía en que el razonamiento matemático podía resolver inequívocamente los problemas, como cuando escribía:

> Reducirse al rigor de la demostración geométrica es una experiencia demasiado peligrosa para cualquiera que no sepa profundamente cómo realizarla; porque así como en la naturaleza misma no hay un campo intermedio entre la verdad y la falsedad, así, en las pruebas rigurosas, uno establece su conclusión indudablemente, de lo contrario cae sin excusa en el error. No hay lugar para mantenerse en pie invocando limitaciones, distinciones, distorsiones verbales y otras acrobacias mentales: por fuerza, en pocas palabras y al primer asalto, uno es o César o nada.[33]

Por otra parte, recordaba a menudo a su lector que sus propias explicaciones eran aproximativas:

> Aquí pondré ante vosotros, no de modo afirmativo sino sólo probable y dubitativamente, cómo pienso que se debe hacer en tan oscura y dudosa materia, las conjeturas que han hallado lugar en el ánimo de nuestro Académico Galilei.[34]

32. Apostilla de Galileo a *Ratio ponderum librae et simbellae* de Orazio Grassi (Paris, 1626), *ibid.*, p. 462, apostilla 113. Con todo, entre las curvas regulares, Galileo consideraba al círculo «más regular, por así decirlo, que cualquier otra» (*ibid.*, p. 244).

33. Galileo, *Il Saggiatore*, *ibid.*, p. 296.

34. Galileo, *Discorso delle comete*, *ibid.*, p. 47.

> Confieso sinceramente (como he hecho siempre) que me siento deslumbrado y casi totalmente ciego cuando se trata de penetrar los secretos de la naturaleza. Ciertamente deseo sobremanera alcanzar algún pequeño conocimiento de alguno de estos secretos, pero nada es más contrario a mi intención que la simulación o la hipocresía. El Sig. Mario, en su ensayo, nada ha fingido, ni tenía por qué hacerlo, por cuanto siempre que ha propuesto algo nuevo lo ha hecho de modo dubitativo y conjetural, y nunca ha buscado hacer que otros acepten como cierto lo que él y yo consideramos dudoso o a lo sumo probable. Hemos sometido esto a la consideración de personas más inteligentes que nosotros, para poder, con su ayuda, o bien confirmar alguna conclusión verdadera, o excluir por completo las falsas.[35]

Cuando Grassi lo acusa de no comprometerse, la réplica de Galileo no es enteramente satisfactoria:

> No nos alejamos de nuestra costumbre, que es la de no declarar que algo es cierto excepto lo que sabemos fuera de toda duda, porque esto es lo que nuestra filosofía y nuestras matemáticas nos enseñan.[36]

Galileo comprendía que la mente humana no podía penetrar los secretos de la naturaleza a menos que abandonara la descabellada pretensión filosófica de un conocimiento exhaustivo. Éste es un aspecto importante de la revolución intelectual de Galileo: la metodología pasa de la tentativa de conocer las partes del universo mediante la comprensión de su significado como un todo a un esfuerzo, más modesto, para comprender el funcionamiento de las diferentes partes sin pretender una visión total del mundo. Las ilimitadas ansias de saber del hombre se debían canalizar y limitar severamente para que fueran productivas. En esa crítica coyuntura, Galileo se propuso comunicar una nueva noción de la investigación científica y enseñar una nueva imagen de la actitud correcta hacia la ciencia. Cumplió esa misión empleando una parábola: inventó la historia de un hombre que un día había descubierto, con considerable sorpresa, que no sólo las aves producían sonidos musicales. Después de investigar diversas fuentes de sonido, creyó que las conocía todas, pero acertó a capturar una cigarra y sintió gran desconcierto. Aunque le cerrara la boca o retuviera sus alas, el estridente sonido no cesaba y, sin embargo, no podía ver movimiento alguno en sus escamas ni en otras partes. Finalmente, levantó las placas del tórax y vio unos firmes ligamentos. Pensó que eran la causa del sonido, y decidió romperlos. Pero no lo consiguió hasta que clavó profundamente la aguja, atravesó el insecto, y tomó su vida junto con su voz, de modo que ni siquiera así pudo estar seguro de que esos ligamentos originaban el sonido:

---

35. Galileo, *Il Saggiatore*, *ibid.*, p. 303.
36. *Ibid.*, p. 279.

> Y entonces asumió tal desconfianza acerca de lo que sabía que, cuando se le preguntaba cómo se producían los sonidos, respondía muy sinceramente que, si bien conocía algunas maneras, estaba seguro de que existían otras cien desconocidas e inimaginables.[37]

La parábola lleva al investigador del sonido a través de tres fases sucesivas de esclarecimiento. Primero, el descubrimiento de que el sonido se puede producir en más de una forma despierta su curiosidad intelectual. Segundo, pasa a una fase inductiva en la que acumula hechos hasta quedar convencido de que el conjunto es exhaustivo. Finalmente, realiza el sorprendente hallazgo de que aún hay otra forma de producir sonido, y éste lo lleva al descubrimiento más asombroso: toda la ciencia está abierta a una drástica revaloración, a la luz de una nueva evidencia. No hay manera de saber si se han investigado completamente los caminos de la naturaleza. Sólo se puede anticipar que aquello que sea posible conocer se podrá expresar en el lenguaje de las matemáticas.

La realización de experimentos

Los hechos no hablan si no se les hacen preguntas; la clase de pregunta que se hace limita y determina la gama de respuestas significativas.

Tanto Galileo como Grassi apelan a datos experimentales para justificar ciertos puntos de sus propias teorías, pero jamás sugieren que los experimentos dieran lugar a las teorías; estiman siempre que ilustraban, confirmaban o desmentían las hipótesis existentes. Para ellos, el laboratorio no era un criadero de teorías sino el lugar de ponerlas a prueba.

El debate sobre los cometas de 1618 ilustra cómo se realizaban los experimentos, sesgados en ocasiones, a la luz de una teoría. Esto se verá claramente en los tres episodios de la guerra de experimentos entre Galileo y Grassi acerca de la influencia de las esferas giratorias, la causa del calor y la naturaleza de los cometas.

La influencia de las esferas giratorias

Aristóteles sostenía que los vapores que se elevaban de la tierra eran arrastrados por el movimiento del cielo. Galileo negaba que un material tan ligero como el aire pudiera ser arrastrado simplemente rozando la

37. *Ibid.*, p. 281. Galileo extraía la moraleja de la historia: «La dificultad de comprender cómo se produce el canto de la cigarra, incluso cuando la tenemos cantando sobre nuestra propia mano, es más que suficiente para excusarnos por no saber cómo se forma un cometa a tan enorme distancia» (*ibid*).

superficie de su recipiente; y lo demostró experimentalmente colocando una vela encendida en el fondo de una vasija: cuando la vasija giraba, la llama se mantenía erguida y, por lo tanto, el aire estaba en reposo. Grassi respondió con un experimento semejante. Puso la vela cerca de la superficie interna de la vasija, y al moverla desde el centro observó triunfante que la llama se desviaba hacia la dirección en que giraba la vasija. Una tira de papel, colgando de un hilo y suspendida cerca de la superficie de la vasija, se desviaba aún más, confirmando así que el aire se movía con su recipiente. Galileo aceptó este reto experimental en *El ensayador*. Esta vez, usó dos velas encendidas, una afirmada dentro de la vasija, a una o dos pulgadas de la parte superior y la otra sostenida con la mano dentro de la vasija, a la misma altura que la otra. Luego se ponía en movimiento la vasija. Galileo pensaba que si el movimiento se trasmitía al aire, como afirmaba Grassi, la llama de la vela unida a la vasija no se desviaría, porque se movería con la misma velocidad que el aire, mientras que la llama de la vela que él sostenía se desviaría. El experimento, sin embargo, demostró justamente lo contrario: la llama de la vela sostenida con la mano se mantuvo derecha y se desvió la llama de la vela unida a la vasija giratoria. Galileo concluyó que Grassi, a lo sumo, podía probar con su experimento que la rugosidad de la superficie de la vasija arrastraba una capa muy fina de aire. Grassi respondió que él jamás había afirmado que el aire giraba tan rápidamente como la esfera en la que estaba contenido, y que el experimento de Galileo distorsionaba la situación empírica real, en que la llama de la vela unida a la vasija encontraba una resistencia del aire, no porque el aire no se moviera sino porque no se movía tan rápidamente como la vasija. Al cambiar de postura, Grassi logró tornar inofensivo el experimento de Galileo.

La causa del calor

Los aristotélicos atribuían calor al movimiento y alegaban como prueba que la punta de un dardo disparado a gran velocidad, se calentaba, y que un viento muy fuerte podía incendiar bosques y barcos. Galileo no negaba la evidencia, pero proponía una interpretación diferente: argumentaba que los vientos fuertes incendiaban bosques o barcos, no por su gran velocidad sino porque hacían entrechocar los tablones de los barcos o las secas ramas del bosque, de modo que se calentaban.

Asimismo, sugería que la punta de una flecha disparada contra un blanco grueso se calentaba, no por la velocidad de su trayectoria, sino por la fricción con la materia del blanco.

Galileo llevó este razonamiento un paso más allá, y explicó que la fricción producía calor por el desprendimiento de algunas partículas de materia. A la luz de esta teoría, consideraba que el vapor que se elevaba

al frotar un cristal con una llave era prueba de que «quizás también se eleven otras partes, más sutilmente sulfurosas y bituminosas, invisibles, pero evidentes por su olor».[38] Galileo permaneció imperturbable cuando Grassi objetó que el vapor visible al frotar un cristal era una nube de diminutas partículas de cristal que se elevaban y pronto caían; y que cuando un pedazo de cristal se quebraba limpiamente no se observaba vapor. Galileo se limitó a afirmar de nuevo su posición, introduciendo una hipótesis subsidiaria para ajustar la evidencia al marco de referencia de su teoría:

> Cuando el cristal se parte en dos, el humo o vapor se eleva; pero es invisible porque no arrastra con él el ligero polvo que lo hace visible; del mismo modo, el viento se hace visible por el polvo que levanta, y no se levanta el polvo si no hay turbulencia del aire; en el aire calmo, el polvo cae al suelo.[39]

Grassi había eludido las consecuencias del experimento de Galileo con una vela mediante la modificación de su teoría; Galileo paraba ahora el golpe de la crítica de Grassi postulando la existencia de una sustancia invisible.

El hecho de que los cuerpos duros como el diamante no se calentaban cuando se los frotaba era también susceptible de diversas interpretaciones. Para Galileo, era un indicio de que no se consumía ninguna parte de sus superficies; para G. B. Baliani eso demostraba que se adherían tan estrechamente que entre ellas no quedaba lugar para que el aire se volatilizara, lo que hubiera expuesto los cuerpos al ubicuo calor celestial, que él consideraba la causa del calor.[40]

Grassi tenía un buen olfato experimental, pero estaba trabado por su tendencia a creer en los escritores antiguos. Por ejemplo, aceptaba, por la autoridad de los clásicos, que algunas veces los proyectiles y las balas de cañón se fundían en el aire debido a su velocidad. Ofrecía incluso, como prueba de la producción del calor mediante el movimiento, la legendaria narración de los babilónicos que cocían los huevos haciéndolos girar con hondas. Esto provocó uno de los comentarios más célebres y devastadores de Galileo:

> Si Sarsi pretende que crea, por las palabras de Suidas, que los babilonios cocían huevos haciéndolos girar velozmente con hondas, lo creeré; pero diré que la causa de este efecto es muy distinta de la que él piensa. Para descubrir la verdadera causa razono en la forma siguiente: «Si nosotros no conseguimos obtener un efecto que otros han logrado anteriormente, debe

38. *Ibid.*, p. 334
39. Apostilla de Galileo a *Ratio* de Grassi, *ibid.*, pp. 480-481, apostilla 137.
40. Carta a Galileo, 8 de agosto de 1619, *ibid.*, Vol. XII, p. 475.

ser que nos falta alguna cosa que era antes la causa de ese efecto; y si sólo nos falta una cosa, entonces ésta será la verdadera causa. Ahora bien: no nos faltan huevos, hondas, ni mozos robustos que los hagan girar velozmente; y sin embargo no se cuecen, sino que, por el contrario, se enfrían más rápido si están calientes. Como lo único que nos falta es ser babilonios, entonces para obtener huevos duros de ese modo es preciso ser babilonio y ésta es, por lo tanto, la causa de su endurecimiento.» Que es lo que queríamos demostrar. ¿Es posible que Sarsi, andando a caballo, no haya observado la frescura que recibe su cara del continuo cambio del aire? Y si la ha sentido, ¿cómo prefiere creer en cosas ocurridas hace dos mil años en Babilonia, y contadas por otros, y no en las cosas actuales que él mismo experimenta?[41]

Galileo reconocía la significación de los experimentos, pero el pasaje anterior es una réplica ingeniosa y no una enunciación metodológica. Lo que se enuncia es simplemente la prioridad de la observación personal sobre las descripciones consagradas por el tiempo. Deberíamos recordar que si bien Grassi no analizaba críticamente sus fuentes, Galileo tampoco estaba dispuesto a cuestionar la precisión de sus propios datos experimentales: una bala de cañón fundiéndose en el aire no es más descabellada que el vapor invisible exhalado por un cristal roto.

La naturaleza del cometa

Galileo desechaba la hipótesis de que los cometas son cuerpos incandescentes por cuanto no se pueden observar a través de una llama, en tanto que se pueden distinguir las estrellas a través de la cola de un cometa. Grassi lo acusó inmediatamente de ceguera ante la evidencia: «En relación con este asunto, me asombra sobremanera que un hombre famoso, a quien le gustan los experimentos, pueda afirmar con tanta seguridad lo que es fácilmente refutable mediante experimentos obvios.»[42]

Grassi defendió a Aristóteles destacando que la mecha es visible en medio de la llama: que en una hoguera encendida se pueden ver trozos de leña a medio arder, y que una hoja impresa es legible a través de la llama de una vela. Concluía, con burda ironía, que Galileo razonaba de la siguiente manera:

Las llamas no son transparentes;
pero la barba del cometa es transparente.
Por lo tanto, la barba del cometa no es una llama.

41. Galileo, *Il Saggiatore, ibid.*, Vol. VI, p. 340.
42. Grassi, *Libra, ibid.*, p. 173.

Sin embargo, era más apropiado decir:

> Los objetos luminosos no son transparentes;
> la barba del cometa es transparente.
> Por lo tanto, la barba del cometa no es un objeto luminoso.[43]

Galileo no se quedó sin respuesta: aun cuando una llama delgada no oculte del todo la luz, no se infiere de esto que una llama de varios cientos de brazos *(braccia)* de grosor –como debería ser la de un cometa– no impida la visión de las estrellas. «Por ejemplo, una nube, que no nos impide ver el tronco de un árbol a veinte o treinta brazos, puede ocultar completamente el sol si se encuentra a una altura de doscientos o trescientos brazos.»[44] Puesto que la guerra de los experimentos se realizaba siempre en el campo de batalla de las interpretaciones, Grassi pudo aún responder: si fuera cierto que una cosa transparente cuando delgada, se vuelve opaca cuando aumenta de grosor, entonces un grueso muro de cristal o de aire impediría el paso de la luz solar...

Galileo intentó apuntalar su explicación de los cometas como refracciones en el vapor atmosférico mediante comparaciones con los halos, los arco iris, los parhelios, los rayos de luz solar que se filtran entre las nubes y las estelas luminosas sobre la superficie del océano. Grassi señalaba que Galileo había menospreciado el hecho más importante acerca de esos fenómenos ópticos: que su posición variaba no sólo con el movimiento del observador, sino también con el del sol. La figura 11, usada

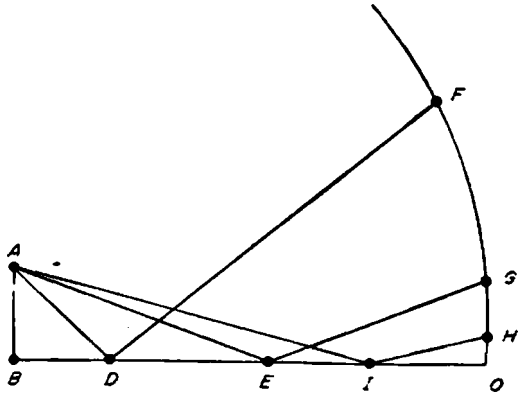


FIGURA 11

43. *Ibid.*, p. 176.
44. Galileo, *Il Saggiatore*, *ibid.*, p. 365.

por Grassi, muestra que la imagen proyectada por el sol sobre la superficie del mar se aleja a medida que el sol desciende. Supongamos que *BI* es la superficie del mar y *A* la posición de un observador sobre la costa. Supongamos que *F*, *G* y *H* son las posiciones sucesivas del sol, y *D*, *E* e *I* las posiciones correspondientes de las imágenes reflejadas cuando los ángulos de incidencia *ADB*, *AEB* y *AIB* son iguales a los ángulos de refracción *FDE*, *GEI* y *HID*. Está claro que las imágenes reflejadas se moverán en la misma dirección que el sol.

Utilizando la analogía de la luz solar reflejada sobre la superficie del agua, Galileo modificó el diagrama de Grassi para demostrar que el cometa parecería alejarse del sol. Se prolonga el arco *FGHO* hasta *N*, y se trazan las rectas *AI*, *AE* y *AD* hasta *L*, *M* y *N* (figura 12). Como el observador en *A* ve el cometa a través de un mar de vapor, cuando el sol está en *H*, se ve su imagen a lo largo de la recta *AI*; por esto parece que el cometa está en *L*. De modo similar, cuando el sol alcanza *G*, su imagen se ve a lo largo de la recta *AE*, y el cometa parece haberse movido hasta *M*. Por lo tanto, el cometa parece moverse en una dirección opuesta a la del sol.

Grassi objetó que este ejemplo geométrico no correspondía a la realidad. El cometa de 1618 no siempre se alejaba del sol. Además, según la

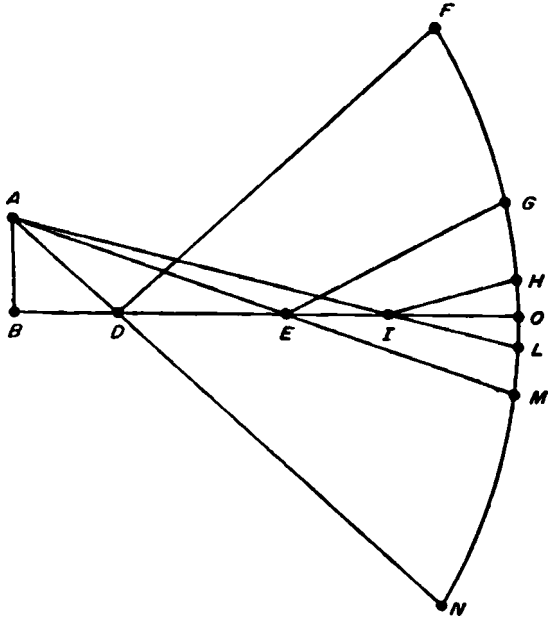


FIGURA 12

reinterpretación de Galileo, las distancias *OL*, *LM* y *MN* recorridas por el cometa son iguales a las distancias *OH*, *HG* y *GF* cubiertas por el sol, pero la observación contradecía también esto.

El desacuerdo entre Galileo y Grassi recuerda que los hechos y los experimentos no existen aislados: siempre forman parte de una red que les da sentido y de la cual derivan su significado. Galileo no creía que la objeción de Grassi anunciara el fracaso de su teoría, sino que indicaba simplemente la necesidad de crear un nuevo ejemplo, que encontró en el reflejo de la luz de una vela sobre una botella. Describió, en *El ensayador*, la construcción de un modelo semejante. Se aplica aceite sobre el punto donde una botella refleja la luz de una vela, y se hace girar la botella de modo que la imagen parece surgir del punto aceitado. Se pasa un dedo sobre el aceite, y se supone que los rayos rectos así formados representan la cola del cometa. Se mueve nuevamente la botella para situar el reflejo de la luz de la vela en la parte no aceitada, donde comienza el rayo. Esto representa la cabeza del cometa, que parece siempre más brillante que la cola. Galileo añadía que se podía obtener el mismo efecto si, en vez de usar aceite, se empañaba la botella. Acababa con una ingeniosa observación, a costa de Grassi:

> Si menciona esta pequeña broma a Sarsi, ruego a Su Ilustrísima que proteste larga y específicamente, en mi nombre, que con esto no pretendo afirmar que hay en el cielo una enorme botella, ni alguien que la aceite con el dedo, ni que así se formen los cometas. Sólo ofrezco este ejemplo (como podría ofrecer otros, y quizás en la naturaleza hay tantos que ni siquiera los soñamos), para ilustrar las abundantes y variadas formas en que la naturaleza produce sus efectos.[45]

Los experimentos no pueden, por sí solos, asegurar la solución automática de los problemas básicos; quienes censuran la terquedad y la ceguera de las mentes concentradas en la rutina habitual, suelen hacerlo porque están entregados y dedicados a una manera diferente –y no necesariamente nueva– de mirar las cosas. Como afirmaba Max Planck, una nueva posición científica no conquista la aceptación general cuando los adversarios cambian de idea, sino cuando se jubilan de sus cátedras.[46]

IV. La naturaleza de la materia

La discusión sobre los elementos últimos de la materia, iniciada en el debate sobre los cuerpos flotantes, reapareció en la controversia de los

45. *Ibid.*, p. 291.
46. Max Planck, *Scientific Autobiography and Other Papers*, ed. F. Gaymor (Williams and Norgate, Londre, 1950), pp. 33-34.

cometas cuando Galileo criticó la idea aristotélica de que el vapor de la atmósfera se calienta por la rotación de las esferas celestes.

Argumentaba que el movimiento en sí no producía cambios, y que la fricción y la compresión eran los únicos agentes del calor, que resulta de la disolución de un cuerpo en partes muy pequeñas que penetran en nuestra carne y producen una agradable sensación de calor o el dolor del ardor y la quemadura.[47] Las superficies muy duras, como los diamantes, o muy lisas, como el cristal, no adquieren calor cuando se frotan porque de ellas no se desprende ninguna partícula.

Giovanni Battista Baliani se quejaba, en una carta a Galileo, de que no estaba claro cómo las partículas pequeñas desprendidas de cuerpos incandescentes podían producir una sensación desagradable moviéndose rápidamente, y una agradable cuando se movían lentamente. No comprendía tampoco de qué modo explicaba Galileo la diferencia entre el fuego en el cuerpo ardiente y la sensación del fuego en la consciencia. Observaba además que la madera, la cera y el aceite se evaporaban, en tanto que el hierro y otros metales no. Galileo garabateó la siguiente réplica en el margen de la carta de Baliani:

> Tenemos 1.000 líquidos como el agua, 1.000 sólidos como la tierra, 1.000 como el aire (lo que se manifiesta con la evaporación de 1.000 fragancias); y ¿por qué no 1.000 como el fuego? Por tanto, el calor que sentimos no procede de la sustancia, sino de la forma, tamaño y movimiento del cuerpo reducido a partes muy pequeñas. Para cortar la carne, no es imprescindible que un cuchillo sea de acero y no de cobre, piedra, hueso o roble. Basta con que esté afilado y corte. Entonces, que la cera se disuelva en *minimi* sustancialmente distintos de aquellos en que se disuelve el hierro no tiene importancia con respecto a la producción de calor en nosotros, en tanto que ambos se disuelven en partes muy pequeñas, móviles y agudas, es decir, capaces de penetrar en los poros de nuestra piel.[48]

La objeción concebida por Orazio Grassi, el principal adversario de Galileo, era menos especulativa, y llevaba de nuevo el debate al nivel de lo empírico y lo cuantitativo. Grassi pesó un trozo de cobre en una balanza sensible, lo martilló en un yunque al rojo vivo, lo pesó nuevamente, y descubrió que no había perdido peso.

> Si en este punto, alguien dijera que las partes perdidas son tan diminutas que ni siquiera una balanza exacta las revela, le preguntaré cómo sabe que se han perdido esas partes, porque no veo cómo podría yo haber examina-

47. Galileo, *Discorso delle comete*, *Opere de Galileo*, Vol. VI, p. 56. Los antecedentes de esta teoría se remontan, por lo menos, a Platón: «Llamamos "caliente" al fuego cuando observamos la forma en que actúa sobre nuestros cuerpos, cortando y dividiendo» (Timeo 61*d*).

48. Apostilla a la carta a Galileo de G. B. Baliani, 8 de agosto de 1619, *Opere di Galileo*, Vol. XIII, p. 475.

> do la materia más correcta y cuidadosamente. Y también, si esta pérdida de partes es tan leve que no pueden percibirla los sentidos, ¿por qué produciría tanto calor? Además, cuando se pule el hierro con una lima se calienta, pero menos, o ciertamente no más, que cuando se golpea muy fuertemente con un martillo, aunque más partes se pierden limando que martillando.

En una apostilla, Galileo rechazaba la interpretación de Grassi:

> No es sorprendente que la balanza no revelara ninguna diferencia: martillándolo durante media hora, se puede arrancar del oro tanto como de un anillo usado durante dos meses: la pérdida, aunque real, no se puede medir con la balanza.

Y a la pregunta de cómo sabemos que se han perdido algunas partes, respondió:

> Esto se sabe porque aquellos cuerpos de los que nada se pierde, no adquieren calor, mientras que sí lo adquieren los que han perdido perceptiblemente algunas partes. Por lo tanto, es razonable creer que los cuerpos que adquieren calor, han perdido algunas partes, aunque no sean perceptibles.[49]

En *El ensayador*, Galileo añadía que el oro perdido por un botón dorado, durante un período de semanas, resulta imperceptible, y que una bola de ámbar puede llenar de perfume una habitación, durante quince días, sin perder nada de su peso.

La réplica de Grassi es instructiva porque él mismo se adjudica el papel de experimentalista obstinado.

> Concediendo que el peso se mantiene igual cuando se martilla el hierro, no se anula el argumento de que podría haber huido algo específicamente más ligero que el hierro. Sin embargo, no hay razón –ni siquiera una hipotética– para decir que, en realidad, ha ocurrido semejante disminución. A menos que la razón señale otro camino, nos guiamos por nuestros sentidos para el conocimiento; los sentidos están de mi lado, y el razonamiento o la inferencia lógica de Galileo fracasan desde el comienzo, como se ha demostrado anteriormente.[50]

Galileo había alegado el humo que se levantaba frotando un trozo de cristal con una llave como evidencia de que lo desprendido era más ligero que el aire. Grassi replicaba que no aparecía humo cuando se rompía limpiamente una plancha de cristal, aunque, según la teoría de Galileo, se debería ver una enorme nube de humo, debido al gran número de po-

---

49. Grassi, *Libra, ibid.*, Vol. VI, pp.161-162.
50. Grassi, *Ratio, ibid.*, pp. 479-480.

ros abiertos. En cambio, una ligera frotación sobre un trozo de cristal produce considerable cantidad de humo; esto demuestra que no se trata de ninguna exhalación misteriosa sino, simplemente, de cristal en polvo. La respuesta de Galileo a esta última objeción es particularmente interesante porque se aparta por completo de los experimentos, y se refugia en las cumbres inaccesibles de la teoría:

> Cuando el cristal se rompe en dos, vuelan el humo o la exhalación; pero invisibles, porque no arrastran consigo el ligero polvo con el cual se hacen visibles.[51]

El despertar de los sentidos

El debate sobre el movimiento como causa del calor, llevó así a Galileo a postular la existencia de partículas invisibles de materia que golpeteaban los órganos de los sentidos y provocaban una respuesta subjetiva llamada calor. Este punto de vista chocaba contra la creencia, fundada en el sentido común, de que el calor era una propiedad intrínseca de los cuerpos; Galileo inventó uno de sus experimentos mentales –uno de los más significativos epistemológicamente– para refutar el realismo ingenuo de esa creencia:

> Tan pronto como concibo una materia o sustancia corpórea, siento inmediatamente la necesidad de concebir al mismo tiempo que tiene límites y una u otra forma, que es, en relación con otras, grande o pequeña; que está en este o aquel lugar, en este o aquel tiempo, que se mueve o está quieta, que toca o no toca a otro cuerpo, que es una, pocas o muchas. No puedo separarla de estas condiciones por ningún esfuerzo de la imaginación. Pero mi mente no siente la compulsión de aprehenderla como necesariamente acompañada de otras condiciones, como que sea blanca o roja, amarga o dulce, muda o sonora, de olor agradable o desagradable. Sin los sentidos para guiarnos, la razón o la imaginación por sí mismas quizás jamás llegarían a esas cualidades. Por esta razón, pienso que los sabores, olores, colores y demás son sólo puros nombres en lo que concierne al sujeto en el que nos parece que residen; y que sólo tienen residencia en el cuerpo que los percibe. De este modo, si se suprimiera la criatura viviente, todas esas cualidades desaparecerían y serían aniquiladas.[52]

Galileo no ponía la naturaleza en el potro; la vertía en el crisol de un experimento mental, y apelaba luego al sentido común y a la experiencia cotidiana para confirmar los resultados. Por ejemplo, observaba que aunque el movimiento de una mano sobre una estatua de mármol o so-

51. *Ibid.*, p. 480, apostilla 137.
52. Galileo, *Il Saggiatore*, *ibid.*, pp. 347-348.

bre una persona viva es idéntico en lo que respecta a la mano, sólo en el hombre podía producir sensación de cosquilleo. Tan erróneo era afirmar que los sabores, olores y colores existen separadamente de los órganos a los que afectan –razonaba Galileo– como atribuir la propiedad del cosquilleo a la mano. Lo que existe en el objeto y produce una sensación es la materia en movimiento. Las partículas de diversos tamaños, formas, cantidades y velocidades hieren los órganos de los sentidos y provocan sensaciones diferentes. Más específicamente, los elementos, en orden de inmaterialidad creciente –la tierra, el agua, el fuego, el aire, la luz– afectan a los sentidos del tacto, el gusto, el olfato, el oído y la vista, respectivamente.

Esta correlación era común entre los exponentes de la teoría de la reciprocidad entre el macrocosmos y el microcosmos, como corrobora un pasaje de *Mondi celesti, terrestri et infernali*, de Anton Francesco Doni:

> El macrocosmos penetra en el alma del microcosmos a través de cinco puertas, es decir, los cinco sentidos. Los cuerpos más luminosos y coloridos, por la vista; los sólidos y terrenales, por el tacto; las cosas de agua, por el gusto; las del aire, por el oído; y, a través del olfato, los vapores hechos de agua, aire, ráfagas de luz o sustancias aromáticas. Por lo tanto, la tierra corresponde al tacto, el aire al oído, el fuego al olfato, y la Quintaesencia (o el cuerpo) a la vista; y así vemos nuevamente el mutuo amor de estos elementos que se combinan tan voluntariamente.[53]

Partiendo de que las sensaciones básicas de tacto, olfato, gusto, oído y vista, que parecían residir en los objetos externos, no tenían realidad fuera del sujeto que las percibía, Galileo extendía su investigación al calor. El fuego, afirmaba, es simplemente un nombre para una multitud de corpúsculos diminutos que golpean los órganos de los sentidos. Causan una sensación placentera cuando ayudan al proceso de la transpiración, y otra desagradable cuando queman y desgarran la piel. En sí, el fuego no es nada, aparte de la forma, el movimiento y el poder penetrante de sus partículas; pero éstas no pueden producir calor a menos que se muevan y, en este sentido, el movimiento es la causa del calor. Esta última consideración parece sugerida por la observación de que la cal viva sólo produce calor cuando se arroja al agua. La conjetura de Galileo era que las partículas de fuego se mantienen sin movimiento en los apretados poros de la cal viva hasta que éstos se abren por la acción del agua.

La terminología de Galileo es digna de atención. A lo largo de todo el análisis de las cualidades primarias y secundarias evitó la palabra «átomo». Las expresiones que emplea son *corpicelli minimi, minimi, ignicoli, minimi ignei, i minimi del fuoco, minimi sottilissimi e volanti* y *i mi-*

53. Anton Francesco Doni, *Monti celesti, terrestri et infernali* (Venecia, 1567), pp. 50-51.

nimi quanti. Estos *minimi* son las partes más pequeñas de una sustancia natural, pero no los últimos elementos de la materia, puesto que se pueden dividir. Galileo sugería, al final de *El ensayador*, que la resolución última en átomos implicaría una transformación radical de la materia:

> Cuando el empequeñecimiento y el desgaste se detienen en los *minimi quanti*, o quedan confinados en ellos, el movimiento es temporal y la acción sólo calorífica; pero quizás cuando se alcanza la última y más alta resolución en átomos verdaderamente indivisibles, se crea luz, cuyo movimiento, o si preferimos expansión y difusión, es instantánea, y puede ocupar inmensos espacios con sus propiedades; no sé si decir sutileza, rareza, inmaterialidad, o alguna otra diferente de todas éstas, y sin nombre.

En un pasaje anterior de la misma obra, Galileo escribía: «una materia etérea y muy sutil se difunde a través del vasto ámbito del universo; y los cuerpos cósmicos sólidos viajan a través de ella por sí mismos.»[54] Estas palabras repetían lo que le había escrito a Piero Dini unos pocos años antes:

> Me parece que existe en la naturaleza una sustancia muy tenue, rápida y sutil, que se difunde por todo el universo y penetra en todas las cosas sin impedimento. Calienta, vivifica y torna fértiles a todas las criaturas vivientes. Nuestros sentidos mismos parecían indicar que el principal depósito de este espíritu es el sol, a partir del cual se expande por el universo una luz enorme, acompañada por este espíritu calórico que penetra todas las materias vegetales y las torna vivas y fértiles. Razonablemente podemos creer que esto es algo más que luz, ya que penetra y se difunde a través de todas las sustancias corpóreas, es decir, muy densas, que la luz no penetra de igual modo. Así como vemos la luz y el calor que proceden de nuestros fuegos (el calor pasa a través de todos los cuerpos aunque sean opacos y muy sólidos, en tanto que los cuerpos sólidos y opacos impiden el paso de la luz), así la emanación solar es a la vez luminosa y calorífica, y la parte calorífica es la más penetrante.[55]

Galileo no estaba seguro de este punto y consideró sucesivamente diversas hipótesis. En su carta a Dini, el calor era más básico que la luz; en *El ensayador*, el orden estaba invertido y la luz tenía prioridad. Al parecer, el cambio había sido dictado por la comprensión de que si el calor era causado por el movimiento y el movimiento se desarrollaba en el tiempo, ya no se podía decir que el calor se propagaba instantáneamente, mientras que todavía se podía decir esto de la luz. Sin embargo, unos

54. Galileo, *Il Saggiatore*, *Opere de Galileo*, Vol. VI, pp. 352 y 317.

55. Carta a Dini, 23 de marzo de 1615, *ibid.*, Vol. V, p. 301. Benedetto Castelli escribió a Galileo el 8 de mayo de 1612: «Un cuerpo luminoso no es más que un cuerpo que vibra continuamente y, por lo tanto, arroja continuamente veloces corpúsculos» (*ibid.*, Vol. XI, p. 295). Galileo no usó jamás esta idea de una fuente pulsante de calor y luz.

años más tarde, en los *Discursos acerca de dos nuevas ciencias*, Galileo abandonó por completo la idea de la propagación instantánea y sugirió un experimento para determinar la velocidad de la luz.[56]

Grassi no estaba dispuesto a dejar así las cosas, y devolvió el ataque en dos planos: la teología y la filosofía escolástica. En teología, apelaba al argumento, común entre los escolásticos desde la Edad Media, de que el misterio de la eucaristía implicaba un cambio sustancial en la naturaleza del pan, a pesar de la permanencia de sus formas sensibles, como el color, el olor y el sabor. Al declarar la subjetividad de estas cualidades, que consideraba simples nombres de un objeto externo, Galileo ponía en peligro el dogma de la transustanciación. Este argumento era deshonesto, no sólo porque establecía una interpretación filosófica como la doctrina de la fe, sino porque llevaba el debate a un terreno que a Galileo no le estaba permitido pisar.

En el plano filosófico, Grassi repitió las habituales objeciones aristotélicas a Demócrito. Si la luz está compuesta de átomos indivisibles, éstos deben ser finitos o infinitos. Pero no pueden ser infinitos, porque no hay un punto medio entre los extremos de una recta formada por un número ininito de puntos; ni finitos, puesto que sobrevendrían entonces dificultades matemáticas. Además, si las diferentes sensaciones eran causadas por las formas diferentes de las partículas en movimiento, la alteración en la forma de las partículas debía modificar la naturaleza de la sensación. Y una sustancia naturalmente dulce, como el azúcar, se podría reducir a un polvo muy fino sin que perdiera su sabor.

El debate podría haber continuado sin llevar a los oponentes a ninguna conclusión. Pero ilustra que la misma doctrina adopta caracteres muy diferentes según los diferentes *backgrounds* intelectuales. Dentro del marco de referencia aristotélico, la teoría atómica conducía a una secuencia de deplorables errores en un mar de contradicciones; en el contexto del pensamiento de Galileo, daba un rodeo alrededor de la jungla de las cuestiones tradicionales, e inauguraba nuevos panoramas.

Viejas ideas convertidas en nuevas

La idea de Galileo de la resolución en *minima*, y finalmente en *átomos*, se presenta como la irrupción arrasadora de una corriente cuyo caudal crecía desde la Edad Media. Averrores había comentado la observación casual de Aristóteles sobre las partículas más pequeñas, y generaciones sucesivas de seguidores aceptaban cada vez más la teoría de los *minima* naturales. Agostino Nifo y Jacopo Zabarella, averroístas pa-

56. Galileo, *Discorsi intorno a due nuove scienze* (Leiden, 1638), *ibid.*, Vol. VIII, pp. 87-89.

duanos, estudiaron extensamente el problema, y atribuyeron a los *minima* una realidad independiente y un papel en las reacciones físicas y químicas. Andrew van Melsen consideraba que éste fue un paso importante en la formación de la perspectiva científica moderna:

> Debido a que los *minima* habían adquirido más realidad física, se tornó necesario examinar cómo las propiedades de los *minima* se podían reconciliar con las propiedades sensibles de la sustancia. Esta necesidad produjo una especial mentalidad, mucho más interesada en las propiedades concretamente observables que en la divisibilidad posible.[57]

Los averroístas estudiaban el problema dentro del marco rígido de la física aristotélica y en términos de materia y forma; pero el hecho de que concedieran efectiva realidad a los *minima* y que aplicaran el concepto a la cualidad, ayudó a preparar el restablecimiento del atomismo en el siglo XVII. Zabarella murió antes de que Galileo llegara a Padua, y es difícil saber en qué medida su escuela puede haber influido en el joven profesor de matemáticas. Galileo leía muy poco pero gozaba de los debates, y esto, en un reducido círculo académico, era suficiente para que un hombre estuviera al corriente de los últimos desarrollos y de los puntos de vista de actualidad. Sin embargo, resulta imposible saber cómo usaba Galileo sus fuentes para sus propios objetivos, o qué productos de las mentes vivaces de sus colegas puede haber tomado prestados, especialmente de aquellos que no se molestaban en publicar. En todo caso, es probable que Galileo se haya familiarizado con la teoría atómica a través de las obras de Galeno que leyó en Pisa, y también que la haya discutido con su amigo Mazzoni, que la menciona en su *In Universam Platonis et Aristotelis Philosophiam Praeludia*.[58]

Incluso la distinción radical entre cualidades primarias y secundarias tenía antecedentes. Los eruditos medievales y del renacimiento dis-

---

57. Andrew van Melsen, *From Atomos to Atom* (ed. Harper, Nueva York, 1960), p. 66. W. Subow menciona la posible influencia de los médicos paduanos que, a fines del siglo XVII, comenzaron a explicar el contagio en términos de partículas diminutas (W. Subow, «Zur Geschichte des Kampfes Zwischen dem Atomismus und dem Aristotelismus im 17. Jahrhundert» (*Minima naturalia und Mixtio*, in N. A. Figurowski *et al.*, eds. *Sowjetische Beiträge zur Geschichte der Wissenschaft* [ed. VEB Deustcher Verlag der Wissenschaft, Berlin, 1960], pp. 181-182.)

58. Mazzoni menciona con aprobación a Proclo, que explicaba las sensaciones de calor y de frío apelando a los átomos: «*Proclus ergo pro defensione Platonis scribit antè quatuor elementa qualitatibus activis, et passivis imbuta, posuisse parva quaedam corpuscula regularia, ut indicaret calorem, et frigus pendere ab acumine, et obtusitate angulorum, et a subtilitate, et crassitie laterum. Quodquidem (meo quidem judicio) magna probabilitate dicitur. Et ante Platonem, et Phythagoram fuit etiam a Democrito et Leucippo et Epicuro creditum*» (J. Mazzoni, *In Universam Platonis et Aristotelis Philosophiam Praeludia, sive de Comparatione Platonis et Aristotelis* [Venecia, 1597], p. 189, cursivas del autor). Vale la pena destacar que esta clase de atomismo es considerada explícitamente por Mazzoni como una defensa de la doctrina de Platón.

tinguian entre los *sensibilia propia* –los objetos de los cinco sentidos– y los *sensibilia communia:* tamaño, forma, cantidad, movimiento y reposo.[59] A los *sensibilia propia* –cualidades secundarias, en la nueva terminologia–, se les concedía un carácter objetivo porque afectaban directamente a los sentidos. A los *sensibilia communia* –a grandes rasgos, las cualidades primarias–, se les asignaba un rango epistemológico inferior porque sólo podían acceder a los sentidos a través de las cualidades secundarias. Por lo tanto, dentro del esquema aristotélico, la percepción significaba la penetración de las cualidades reales de las cosas mismas en los sentidos, la participación de la conciencia en la realidad objetiva del mundo físico. De este modo, los sentidos no se podían engañar acerca de las propiedades tactiles, el color, el sabor, el sonido y el olfato; pero sí acerca de las cualidades primarias «inferidas». Para los atomistas, sin embargo, la percepción no era ya una participación vicaria en la realidad del mundo, sino una interpretación subjetiva de la disposición física de los átomos que asediaban los aparatos sensoriales. Los átomos componían la naturaleza, pero no podían ser percibidos directamente, y no cabía la esperanza de demostrar empíricamente su existencia; por definición, estaban por debajo de las dimensiones sensibles. Entonces, ¿por qué se debían inferir del mundo visible? Galileo nunca planteó exactamente el interrogante en estos términos, pero poco después, en los *Discursos acerca de dos nuevas ciencias*, intentó demostrar que los átomos eran necesarios para tornar posible el razonamiento matemático objetivo.[60]

Pero si el mundo se nos presenta como un rompecabezas que debemos armar, ¿cómo podemos saber qué partes se ajustan unas a otras? ¿Cómo podemos organizar las agrupaciones de entidades discretas? El flamante concepto de átomo hizo imperativo otro paso: la concepción de la mente como un instrumento para seleccionar impulsos discretos. Galileo no dio ese paso ni parece que haya tenido conciencia de su inevitabilidad, pero la distinción que trazó abrió un mundo entero de nuevos interrogantes: ¿cuál es la diferencia entre la experiencia interior y el mundo exterior? ¿Cómo podemos estar seguros de los datos de los sentidos? ¿Cuál es la distinción entre la realidad privada y la verdad pública? El hecho de que los filósofos traten de resolver todavía hoy estos problemas, da la medida del poder revolucionario y fecundo del renacimiento del atomismo en el siglo XVII. Es también un tributo a la osadía de Galileo.

---

59. Por ejemplo, Tomás de Aquino, *Summa Theologiae, prima pars, qu.* 78, *art.* 3, *ad* 2m. La distinción entre los «sensibles» propios y los comunes ya se expresaba claramente en *De Anima* de Aristóteles, libro 2, capítulo 6, 418*a* pp. 8-22.

60. Galileo, *Discorsi, Opere di Galileo.* Vol. VIII, pp. 72-81.

La gran ambición de Galileo, la obra que anhelaba legar al mundo, era la validación definitiva de la teoría heliocéntrica, demostrada por Copérnico y obvia para los matemáticos, pero que aún se debía probar al hombre de la calle. Durante muchos años, había estado luchando contra la objeción de Tycho: si el sol está en el centro del universo, la órbita y la velocidad de los cometas debe ser irregular. G. L. Ramponi le recordó esta dificultad reiterando, con la inconsciente crueldad del admirador ferviente, su seguridad de que Galileo resolvería el problema. Galileo hizo más que eso: lo abolió. El ingobernable curso del cometa sólo era una amenaza si era real; si se podía demostrar que era meramente un fenómeno de refracción en la atmósfera, ya no sería una amenaza para los copernicanos. Pero la evidencia acusadora seguía mostrando su fea cabeza, y Galileo la eludió hasta que cayó en una contradicción: el curso del cometa no podía declinar hacia el norte y seguir perpendicular a la superficie de la tierra, como su teoría exigía. Pero Galileo permaneció impávido, no por jactancia, sino porque estaba seguro de que, por difícil que fuera abrir la cerradura, era él, y no sus adversarios, quien tenía la llave del conocimiento. Tenía la certeza de que el lenguaje de la naturaleza era matemáticamente claro y estéticamente placentero. Los pitagóricos habían descubierto la idea de que la naturaleza estaba hecha de números y de que los números tenían una forma precisa. Galileo hizo a un lado el malabarismo con los números y supuso que la forma era el principio subyacente de la realidad. Las rectas, los triángulos, los cuadrados, los cubos y los círculos eran los ladrillos del mundo; y como éstos estaban económicamente organizados, las figuras más simples –la recta y el círculo– eran preferibles a las más complicadas, como la elipse.

Era obvia otra implicación: como no era posible comprender totalmente la naturaleza de los cuerpos por lo que se percibía su comportamiento, los hechos no interpretados (esto es, los no geometrizados) eran sólo la materia prima de la ciencia. Los sentidos ya no eran guías confiables para el conocimiento, y el rol del experimento era confirmar o refutar lo que se había deducido por consideraciones geométricas. En este punto, Galileo iba más allá de los humanistas, quienes también se quejaban de la filosofía tradicional. Se oponían al estilo escolástico, pero reemplazaban el razonamiento dialéctico y la deducción silogística con una marea de retórica. Las cartas de los amigos literarios de Galileo están llenas de repeticiones y de imprecisiones conceptuales. En vez de pruebas o demostraciones, acumulaban una afirmación sobre otra. En vez de aportar argumentos para apoyar una proposición, la embellecían con nuevas metáforas. Galileo reemplazaba esta efusividad discursiva con el rigor de la geometría, si no en la práctica, al menos como principio. Si no lo hubiera hecho así, su ataque a la autoridad no habría sido más que una rebelión mitad heroica, mitad petulante, y del todo inútil.

Galileo tomó por asalto la ciudadela aristotélica cuando declaró que la descripción científica del comportamiento de las cosas debía referirse a las propiedades matemáticamente analizables, como las formas y los movimientos. En ese momento se ganó la batalla: y se puede considerar la historia posterior de la ciencia del siglo XVII como una prolongada operación de limpieza, organización y consolidación.

5

EL FIN DEL COSMOS ARISTOTÉLICO: LA PRIMERA JORNADA DEL *DIÁLOGO*

De Revolutionibus Orbium Caelestium, la obra de Nicolaus Copernicus que creó una nueva época, se publicó en 1543. Cuando Galileo, cincuenta años más tarde, se interesó por los problemas astronómicos, la teoría heliocéntrica ya no era una idea nueva. En los círculos educados, era noción corriente que diversos humanistas habían intentado establecer una visión real del mundo retornando a los antiguos. Buscaron la ayuda de Ptolomeo; como no la recibieron, el paso siguiente fue examinar las ideas de la astronomía griega que había sido reemplazada por el sistema ptolemaico. Copérnico había retornado a Aristarco; Fracastoro se remitía a Eudoxos y Aristóteles, y Tycho Brahe (sin reconocerlo explícitamente) revisaba los puntos de vista de Heráclides de Ponto. Los eruditos libraron la gran controversia astronómica del siglo XVI sobre ideas que creían a menudo atrevidas y revolucionarias, pero casi nunca originales.[1]

Sin embargo, el copernicanismo se convirtió en la bandera de quienes reaccionaban contra las fuerzas del conservadurismo académico, atrincheradas en las universidades. Al intentar escapar de lo que consideraban las trabas del aristotelismo escolástico, los pensadores radicales del siglo XVI se volvieron curiosos hacia cualquier teoría que apoyara su deseo de innovación. «Muchas discusiones del copernicanismo», escribe Marie Boas Hall,

> se plantean dentro del marco de referencia del anti-aristotelismo y, algunas veces, se tiene la impresión de que la defensa del copernicanismo es, en cierto modo, una respuesta a los placeres intelectuales de la novedad y la perversidad. En todo caso, si se quería atacar a Aristóteles de todos modos,

---

1. Nada resume mejor la novedad en el siglo XVI que el proverbio francés *réculer pour mieux sauter*. Normalmente se consideraba a Copérnico el campeón de la antigua doctrina de los pitagóricos; un ejemplo es el título del tratado astronómico de Thomas Digges: *A Perfit Description of the Celestial Orbes according to the Most Aunciente Doctrine of the Pythagoreans, Lately Revived by Copernicus and by Geometrical Demonstration Approved* (1576). El mismo Galileo alababa a los antecesores del copernicanismo: «Nadie podrá llamarlo ridículo, a menos que también le parezcan ridículos y estúpidos Pitágoras y toda su escuela. Filolao

¿qué mejor manera de discrepar con las bases cosmológicas de su filosofía natural? Este anti-aristotelismo explica por qué hombres que no eran astrónomos y ni siquiera científicos se refirieron tan favorablemente a Copérnico, y también por qué se asocia con frecuencia el copernicanismo con el libre pensamiento y con las aventuras más extravagantes del epicureísmo lucreciano.[2]

Los amigos literarios de Galileo, Virginio Cesarini y Giovanni Ciampoli, aunque inocentes de todo conocimiento científico, aceptaban la «nueva» cosmología como la contrapartida de su «nueva» poesía.[3] Alababan con entusiasmo el copernicanismo y lo recomendaban con metáforas elogiosas, pero parecían incapaces de sostener con argumentos racionales el sistema que defendían tan enérgicamente. Podemos comprender por qué los filósofos –que trataban de resolver el difícil problema del movimiento– y los astrónomos expertos –interesados en calcular tablas precisas– se impacientaban ante la algarada adolescente de los jóvenes rebeldes. En esa protesta sólo podían ver la sublevación inmadura y jactanciosa de una generación contra la autoridad de sus mayores. Estaban convencidos de que, a su debido tiempo, esos jóvenes verían la luz, especialmente después de leer las *Cartas Astronómicas* de Tycho Brahe, que «ponía en su lugar» las últimas afirmaciones copernicanas.

Tycho Brahe se preocupó de resumir sus argumentos en un lenguaje no técnico, y su obra se transformó rápidamente en el manual de los profanos que deseaban citar a un experto para atacar al adversario que creía en el movimiento de la tierra. Tycho añadía nuevas objeciones a las dificultades de la teoría heliocéntrica ya reconocidas por Copérnico, como la necesidad de que Venus y Mercurio tuvieran fases como la luna, y de que las variaciones de los diámetros aparentes de Venus y Marte fueran mucho mayores que las observadas. En primer lugar, argumentaba que la rotación diurna de la tierra impondría consecuencias que chocaban con la experiencia; por ejemplo, una bola de plomo arrojada desde una alta torre no golpearía el suelo a sus pies sino a cierta distancia hacia el oeste, y que una bala de cañón disparada hacia el este no llegaría tan lejos como otra disparada hacia el oeste. En segundo lugar, observaba que, para explicar la ausencia del paralaje estelar, las estrellas

---

el maestro de Platón, el mismo Platón (como dice Aristóteles en su libro *Acerca de los cielos*), Heráclides de Ponto y Ecfanto, Aristarco de Samos, Nicetas y el matemático Seleuco» (*Consideraciones acerca de la hipótesis copernicana* (1616), *Opere di Galileo*, Vol. V, p. 352).

2. Marie Boas Hall, *The Scientific Renaissance 1450-1630* (ed. Collins, Londres, 1963), pp. 96-97.

3. Virginio Cesarini comparaba la «nueva» poesía de Giovanni Ciampoli con la «nueva» astronomía de Galileo: «te dignarás aceptar la sugestión de que, así como tú has encontrado muchos errores en Ptolomeo, otros quizás han hallado imperfecciones en los poetas toscanos que han escrito hasta ahora» (carta a Galileo, 1º de octubre de 1618, *Opere di Galileo*, Vol. XII, p. 415).

deberían estar, por lo menos, setecientas veces más lejos de la tierra que Saturno del sol. Esto, a la vez, exigiría que las estrellas de tercera magnitud, que a ojo desnudo parecen tener un minuto de arco, fueran tan grandes como la órbita de la tierra alrededor del sol, un tamaño descabellado en cualquier sistema astronómico. Más condenatorias aún eran las cuidadosas observaciones de Tycho revelando que no se podía asignar un curso circular a los cometas en el universo copernicano, y que no se podía detectar un movimiento anual en las posiciones aparentes de las estrellas debido al movimiento de la tierra alrededor del sol.

Sin embargo, a pesar de estas serias dificultades, Galileo estaba a favor de copernicanismo. Es más fácil de comprender si recordamos que Tycho y Galileo representaban no sólo teorías rivales sino orientaciones psicológicas –o estéticas– diferentes. Galileo era esencialmente un astrónomo teórico que hacía observaciones y usaba las de otros; pero estaba muy lejos de esperar que la astronomía observacional proporcionara medidas exactas que todos debieran aceptar. Sólo aquellos que valoraban mucho más la pureza matemática que la precisión cuantitativa podían ser copernicanos convencidos y militantes. El universo centrado en el sol nada decía al sentido utilitario del astrónomo experto, pero mucho al sentido estético del matemático dispuesto a cambiar las armonías celestiales menores por una gran discordia terrestre. Las predicciones numéricas basadas en el nuevo sistema eran apenas mejores que las conocidas anteriormente, e incluso si hubieran sido más precisas, todavía habría sido posible –e intelectualmente respetable– afirmar que la hipótesis copernicana era simplemente un instrumento de cálculo. El mismo Galileo reflexionó sobre el problema durante varios años. Sin embargo, en 1597 rompió su silencio, y en el transcurso de dos meses escribió dos cartas declarando su fidelidad al copernicanismo. La publicación de *In Universam Platonis et Aristotelis Praeludia* de Jacopo Mazzoni, apresuró el fin de su larga reticencia.

El desafío de Mazzoni

Jacopo Mazzoni, amigo y anterior colega de Galileo en la Universidad de Pisa, era un erudito ecléctico que intentaba reconciliar las enseñanzas de Aristóteles y Platón. Abarcando una amplia gama de temas, se propuso rebatir el movimiento de la tierra, que consideraba una grave amenaza a los fundamentos mismos de la doctrina de Aristóteles con lo que le parecía un nuevo argumento contra Copérnico. En realidad, se limitó a reiterar la objeción clásica de que el horizonte cortaría desigualmente la esfera de las estrellas si la tierra no estaba en el centro del mundo, pero apuntalada por la «observación», extraída de *Meteorologica* de Aristóteles, de que el Monte Cáucaso es tan alto que el sol ilumina la cima durante un tercio de la noche. Esto significaba, según la suposición

de Mazzoni, que desde la cima del Cáucaso se podían ver dos terceras o quizás tres cuartas partes de los cielos y concluía que, si la tierra se movía, se debería ver al menos otro tanto de la esfera estelar.

Inmediatamente, Galileo advirtió el error en el razonamiento de su amigo, y le envió una carta donde sugería una interpretación diferente. Según las tablas de la época, el radio terretre era de 3.035 millas; el sol se hallaba a 1.216 radios y las estrellas a 45.225 radios terrestres. A partir de estos datos, Galileo razonaba de la siguiente manera:

Si *BFE* es, en la figura 13, la esfera de las estrellas; *IC*, el diámetro de la tierra; y *L*, un punto en el espacio tan lejos de la tierra como el sol, *LC* = 1.216 radios terrestres y *BL* = 45.208 radios terrestres (éste es el valor dado por Galileo; el valor correcto es 45.211).

Se unen ICL. Se traza BLE, perpendicular a *ICL*, y *DIH*, paralela a *BLE*. Se traza *BOA*, tangente al círculo *IG* en *O*, que encuentra la recta prolongada *LC* en *A*, la cima de una alta montaña. El plano horizontal en *I*, el pie de la montaña, es *DHI*, pero un observador situado en *A* pue-

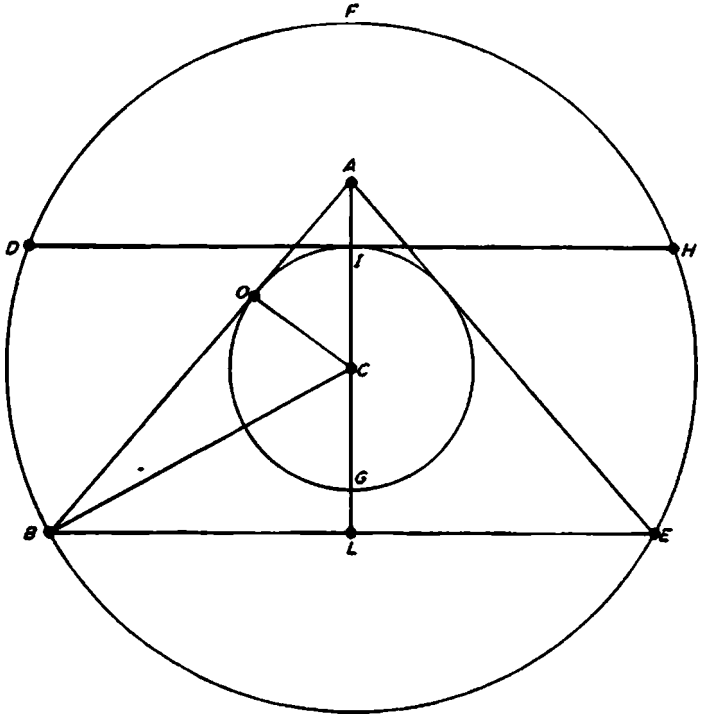


FIGURA 13

de ver el arco completo *BFE*. Ahora bien, si la tierra se moviera hasta *L*, una distancia igual al radio de su órbita alrededor del sol, el plano horizontal *BLE* cortaría la misma porción de la esfera celeste, *BFE*. Por lo tanto, la cantidad adicional de esfera estelar visible si la tierra se moviera alrededor del sol no sería mayor de la que se puede ver desde la cima de una alta montaña.

El paso siguiente establece la altura de la montaña *IA*. Puesto que los triángulos *BCL* y *CDA* son similares y se conocen los valores de *BC*, *BL*, *LC*, y *CI*, es una cuestión de simple geometría determinar que *IA* es igual a 1.141 millas. Ahora bien, la cantidad adicional de esfera estelar visible desde la cima de semejante montaña es sólo de 1° 32', una diferencia demasiado pequeña para ser detectada, al menos a ojo desnudo. De ahí que Galileo pudiera concluir que la revolución de la tierra alrededor del sol no ocasionaría una diferencia perceptible en la cantidad de estrellas visibles.[4]

Este argumento exige dos comentarios. En primer lugar, Galileo anunciaba ya el cambio del universo geocéntrico por el heliocéntrico al suponer que la recta *BE*, que marca el límite de la esfera estelar visible, es tangencial al círculo de la órbita (aparente) del sol alrededor de la tierra. Si esto se admite, entonces el argumento siguiente de Galileo es una aproximación bastante cercana; pero está claro que la suposición es gratuita si se mantiene la hipótesis geocéntrica. En segundo lugar, Galileo sugiere el paso del universo ptolemaico (centrado en la tierra) al copernicano (centrado en el sol), pero no lo elabora. Evidentemente, al girar la tierra alrededor del sol, la proporción de la esfera estelar vista desde la cima de la montaña *A*, debería cambiar ligeramente (aunque no sería observable porque el radio *LC* de la órbita es solamente 1/38 × *BC*), siendo algunas veces mayor y otras menor que la correspondiente a la versión ptolemaica. Alternativamente, la altura en que se vería la misma proporción de la esfera estelar variaría a lo largo del año. Sin embargo, en esta etapa, a Galileo no le interesaba desarrollar su propia teoría, y no trató de articularla con cierto detalle; le bastaba con «demostrar» el error de Mazzoni.

Galileo, como gran número de sus contemporáneos, creía que la cosmología aristotélica había acabado en un callejón sin salida y que no ofrecía la posibilidad de desarrollos posteriores. El copernicanismo ofrecía una alternativa atractiva pero, como sistema cosmológico, su estado era aún más hipotético que la teoría geocéntrica. Antes de embarcarse resueltamente en la aventura copernicana, Galileo necesitaba cierta seguridad de que valía la pena el riesgo y, en especial, el riesgo de un matemático que se enorgullecía del poder explicativo de la geometría. Cuando comprendió que podía utilizar las matemáticas para desmante-

4. Carta a Jacopo Mazzoni, 30 de mayo de 1597, *ibid.*, Vol. II, pp. 197-202.

lar el último argumento contra el movimiento de la tierra, se sintió bastante confiado para escribir a Kepler, un mes más tarde, que era un copernicano profeso.[5] En este sentido, el desafío del argumento de Mazzoni bien puede haber desempeñado un papel decisivo en las ideas de Galileo acerca del sistema del mundo. Sin embargo, por el momento, su adhesión al copernicanismo no tenía especial significación. El debate sobre la teoría heliocéntrica no podía revivir sin nuevas pruebas, y sólo en 1610 el telescopio empezó a transmitir los mensajes de las estrellas.

La evidencia desde la altura

En 1610, Galileo publicaba su *Siderus Nuncius*, donde revelaba la existencia de estrellas desconocidas, la naturaleza de la Vía Láctea, la superficie escarpada de la luna y la presencia de satélites alrededor de Júpiter. Las sorprendentes similitudes entre la luna y la tierra hicieron aún menos plausible la ya dudosa división entre el mundo sublunar y el celestial; y el hecho de que Júpiter recorriera su órbita acompañado por cuatro satélites le proporcionaba a Galileo la respuesta a quienes preguntaban cómo la tierra podía volar a través del espacio sin perder sus satélites. El telescopio siguió dando testimonio de la verdad de la visión de Copérnico y, pocos meses después, Galileo pudo verificar que Venus tenía fases y que las variaciones de los diámetros aparentes de Marte y Venus coincidían con la teoría heliocéntrica. A fines de 1610, la hipótesis copernicana había traspuesto el umbral de la respetabilidad. Incluso Clavius, el erudito y prudente astrónomo del Collegio Romano, elogió los descubrimientos de Galileo en términos que no dejaban lugar a dudas.

Pero la batalla de ningún modo estaba ganada. Un mero largavista no podía derrocar una teoría sobre la estructura del mundo. Los aristotélicos entendían que Galileo debía enfocar los problemas reales con los ojos de su mente, antes de que ellos se dispusieran a alterar sus convicciones acerca de la naturaleza del universo.

Dirigió la oposición Lodovico Colombo o delle Colombe, agudo e ingenioso florentino, autor de un corto ensayo titulado *Contra el movimiento de la tierra*, que no se publicó pero que circuló ampliamente como manuscrito. Reconocía los descubrimientos de Galileo e intentaba restarles importancia sugiriendo que simplemente confirmaban lo que habían afirmado siempre los peripatéticos, es decir, que las *novae* generadas en el cielo no eran «verdaderas» estrellas de *pedigree* quintaesencial. Colombo repetía las objeciones de Tycho Brahe, y sus argumentos carecían de originalidad. Sin embargo, eran representativos de la

5. Carta a Kepler, 4 de agosto de 1597, *ibid.*, Vol. X, p. 68.

persistente duda acerca del sistema copernicano entre los florentinos educados, y Galileo los refutó extensamente en la Segunda Jornada de su *Diálogo acerca de los dos sistemas máximos del mundo.*

El problema esencial para Colombo y los seguidores de Aristóteles no era si el copernicanismo podía explicar tan bien los fenómenos como el sistema ptolemaico. Estaban de acuerdo en que se podían imaginar sistemas diferentes, e incluso mutuamente incompatibles, que explicaran el movimiento de los planetas. Pero si los matemáticos podían elaborar diversos métodos, igualmente satisfactorios, para predecir el curso de los cuerpos celestes –si se aceptaba, en otras palabras, una interpretación instrumentalista de la astronomía–, no correspondía a los astrónomos –a juicio de los aristotélicos– decidir qué sistema era el *verdadero,* sino a los filósofos naturales. En esta perspectiva, el problema básico era: ¿se puede mover la tierra? Su naturaleza, ¿permite o prohíbe la posibilidad del movimiento en el espacio? O, como declaraba Colombo:

> ¿Qué arquitecto ha empezado nunca a ejecutar un proyecto elaborado en su mente sin examinar primero el material que se propone usar y ver si el terreno es adecuado? Vosotros, filósofos, debéis examinar primero si la tierra es un tema apropiado para el sistema copernicano, y averiguar luego si las construcciones matemáticas son sólidas y no dan lugar a contradicciones.[6]

Por lo tanto, el tema del debate era, ostensiblemente, la corrección del procedimiento científico. Los aristotélicos objetaban que se reemplazara la realidad empíricamente dada por modelos matemáticos ideales; no podían permitir que la abstracción adquiriera prioridad sobre los hechos. Pero el contexto imaginativo o la componente visual del modelo desempeñaban una parte más importante que los argumentos lógicos que el modelo pretendía aclarar; y todo el proceso mental de Colombo se apoyaba en una vivida imagen de la tierra inmóvil en el centro del universo. Razonaba, por ejemplo, que si la tierra no estuviera en el centro de la esfera estelar, las estrellas parecerían más grandes para los observadores terrestres situados del lado más próximo al cielo. Como señalaba Galileo, ese argumento presuponía «la sustitución inconsciente de la órbita de la tierra en torno del sol por el globo terrestre.»[7]

Galileo interpretaba los datos de la observación según la suposición opuesta de que la tierra giraba sobre su eje y alrededor del sol. Pero el problema era reconciliar este punto de vista con el sentido común. Cuando Colombo objetaba que, si la tierra giraba como un trompo, los pájaros serían incapaces de volar, Galileo replicaba que el aire debía acompañar a la tierra. Para él, esto era evidente en sí, pero entraba en pugna con la imagen de una tierra estacionaria, que era el *background*

6. Lodovico Colombo, *Contro il moto della terra* (1610), *ibid.*, Vol. III, p. 255.
7. *Ibid.*, p. 282, apostilla 36.

gráfico del pensamiento contemporáneo en materia astronómica. Un viento fuerte podía «arrastrar» a los pájaros en cualquier sistema, incluso el aristotélico; pero no era éste el «arrastre» a que se refería Galileo. Se necesitaba un cambio más radical: era menester reinterpretar drásticamente la experiencia cotidiana. Galileo comprendía que los argumentos físicos de sus adversarios no se podían rechazar terminantemente; a lo sumo, se podía demostrar que eran inconcluyentes porque eran ambivalentes y sólo adquirían un significado preciso dentro del contexto de una determinada teoría. Pero, además, Galileo debía aprender que, si bien podía afrontar la cinemática de la situación, la dinámica involucrada era realmente demasiado compleja para las herramientas conceptuales que tenía a su disposición.

En 1615, Galileo se aventuró a ir a Roma en una peregrinación copernicana. Habló públicamente en casas de diversas personalidades notables, y especialmente en la de Laurenzo Magalotti, donde encontró la oposición de Francesco Ingoli, el fundador del Colegio de la *Propaganda Fide*. Cuando finalizó la reunión, Ingoli accedió a sentar por escrito sus objeciones, que posteriormente envió a Galileo. No eran originales ni estaban expresadas de una manera particularmente fresca o vigorosa, pero eran características del punto de vista conservador que prevalecía en Roma. Ingoli creía que las Escrituras se oponían a la teoría heliocéntrica, y preguntaba: ¿cómo podía una tierra en movimiento reconciliarse con el milagro de Josué, que había detenido el sol, o con la ubicación tradicional del infierno en el centro del universo? Pero Ingoli anhelaba también rechazar el copernicanismo fuera del terreno bíblico, y formuló varias objeciones típicas. La siguiente lo es particularmente:

> Si el sol estuviera situado en el centro del mundo, debería tener un paralaje más grande que la luna. Pero esta consecuencia es falsa y, por lo tanto, también lo es la premisa. Está claro que la premisa determina realmente la consecuencia: los cuerpos que están más lejos del firmamento tienen un paralaje mayor.[8]

Como Colombo antes que él, Ingoli confundía sus coordenadas y discutía las propiedades del sistema copernicano mientras conservaba la representación gráfica del universo ptolemaico. Galileo aclaró esto en su réplica:

> Te aferras a la idea de que la tierra está situada en el centro del firmamento; luego infieres –como consecuencia necesaria– que, la luna, por hallarse muy cerca de la tierra, está mucho más lejos del firmamento que el sol... Al oír que los astrónomos observan un paralaje bastante mayor en la luna que

8. Francesco Ingoli, *De situ et quiete terrae contra Copernici systema, ibid.*, Vol. V, p. 404.

> en el sol, has imaginado que la causa de ese mayor paralaje es la mayor distancia del firmamento. Este razonamiento supone, sin embargo, que la tierra, o más precisamente el ojo del observador, se encuentra en el centro del firmamento. Es decir que das por sentado que la tierra, y no el sol, está en el centro del universo. ¡Pero esto es precisamente lo que está en tela de juicio![9]

Tanto copernicanos como anticopernicanos podían esgrimir los mismos argumentos, ostensiblemente basados en observaciones y experimentos directos, para demostrar la validez de sus tesis, diametralmente opuestas. El factor esencial del desacuerdo acerca de la forma en que debían intepretarse los datos empíricos eran las construcciones *a priori* de ambas partes. Lejos de ser decisivos, los experimentos, interpretados de diversas formas, reflejaban simplemente las posiciones ya obvias de sus defensores.

En la segunda década del siglo XVII, la teoría heliocéntrica era todavía una cuestión candente. Infortunadamente, el debate se interrumpió en 1616, cuando *De Revolutionibus*, de Copérnico, fue incluido en el Index de los libros proscriptos por las autoridades eclesiásticas romanas. Galileo se había resignado prácticamente al silencio cuando, en 1623, el cardenal Maffeo Barberini, humanista y defensor de las artes, accedió al papado con el nombre de Urbano VIII. Ante la sugerencia de sus amigos del Vaticano, Galileo viajó a Roma en la primavera de 1624, y fue recibido seis veces por el Papa, en el curso de seis semanas. Fracasó en su empeño de levantar la interdicción del copernicanismo, pero de todos modos, creyó entender que él era libre de escribir en apoyo de la teoría heliocéntrica siempre que «se mantuviera alejado de la sacristía», como Monseñor Piero Dini le había aconsejado. Con este aliento inició, a los sesenta años, su magna obra *Diálogo acerca de los dos sistemas máximos del mundo*, que completó en 1630 y vio publicada dos años después.

LA PRIMERA JORNADA DEL DIÁLOGO

Los tres interlocutores del *Diálogo* son el florentino Filippo Salviati (1583-1614), el patricio veneciano Giovanfrancesco Sagredo (1571-1620) y el aristotélico Simplicio, un personaje imaginario. Galileo los muestra reunidos en el palacio de Sagredo, en Venecia, durante cuatro días, para discutir los argumentos a favor y en contra del sistema heliocéntrico. Salviati es un militante copernicano; Simplicio, un manifiesto defensor del geocentrismo y Sagredo, un aficionado inteligente, ya medio convertido a la nueva astronomía.

La Primera Jornada continúa la larga historia del anti-aristotelismo. Galileo, como podíamos esperar, utiliza ampliamente la crítica de sus

9. Carta a Francesco Ingoli (1624), *ibid.*, Vol. VI, pp. 516-517.

precedesores a la filosofía peripatética. Lo que debemos considerar significativo, sin embargo, es la habilidad con que lanza su ataque. Ningún crítico anterior de Aristóteles había sido un escritor tan dotado, tan capaz de convencer a un adversario por el puro brillo de su presentación, tan hábil para expulsarlo de la escena a carcajadas cuando se negaba a dejarse convencer. Galileo utilizó los recursos literarios de su italiano nativo para comunicar *insights* y para estimular la reflexión, pero su estilo no poseía la desnuda objetividad de un informe de laboratorio moderno ni el rigor absoluto de una deducción matemática. Las palabras son algo más que vehículos del pensamiento puro. Son entidades sensibles, asociadas a imágenes, recuerdos y emociones. Galileo sabía cómo utilizar estas asociaciones para atraer, mantener y absorber la atención. No presentaba sus ideas con la desnudez del pensamiento abstracto; las vestía con los colores del sentimiento. No se proponía sólo informar y enseñar, sino también conmover e incitar a la acción. Deseaba conseguir nada menos que la anulación de la decisión de 1616 contra el copernicanismo; le parecía que la forma del diálogo era la que mejor podía conducir a este fin. Es verdad que el diálogo escrito está desprovisto de la elocuencia de la expresión facial y del enfásis de los gestos, del apoyo del tono modulado y el cambio de volumen; pero mantiene la efectividad de las pausas, la sugerencia de las preguntas y el significado de las omisiones. Galileo aprovechaba al máximo estas técnicas, y es importante tenerlo en cuenta cuando valoramos sus argumentos, porque con demasiada frecuencia, se citan pasajes del *Diálogo* sin suficiente conciencia crítica de su contenido altamente retórico.

La posición ventajosa de nuestro conocimiento, más desarrollado, implica también una seria amenaza a la comprensión. Las consecuencias de ciertas leyes nos parecen obvias, y naturalmente esperamos que Galileo las haya advertido. Nuestro deseo innato de coherencia nos predispone a confundir las leyes de la lógica con las leyes del pensamiento, y a crear un lecho de Procusto al que se deben ajustar los documentos. Como toda lectura implica interpretación, se imponen automáticamente a los textos significados e implicaciones que, «lógicamente», deberían tener pero que, en realidad, no tienen. El escritor de hoy confía en que podamos eludir este peligro; pero las conflictivas interpretaciones del *Diálogo* de Galileo nos recuerdan constantemente que no existe una vía regia hacia la erudición galileana.

La crítica de Aristóteles

En el sistema aristotélico, la tierra redonda está fija en el centro del universo y las esferas elemental y celeste la rodean concéntricamente, como las capas de una cebolla. La esfera de la luna divide el universo en dos regiones netamente diferenciadas: la terretre y la celeste. En esta úl-

tima. los cuerpos están compuestos de un quinto elemento o quintaesencia, ingenerable e incorruptible, y que sólo sufre un tipo de cambio: el movimiento circular uniforme. Los cuerpos situados entre la tierra y la luna están sujetos a toda clase de cambios, y su forma de movimiento natural es el movimiento rectilíneo hacia su lugar natural en la esfera del elemento del que están compuestos. La prueba de este punto de vista está en el movimiento libre de los cuerpos desde y hacia el centro de la tierra; el fuego se mueve directamente hacia arriba; la tierra cae directamente hacia abajo.

Para reemplazar este cosmos *doble* por el *uni-verso* copernicano, Galileo debía demostrar que el análisis de Aristóteles era lógicamente insconsistente y vacío de fundamentos empíricos reales. Lo hizo atacando la distinción, aparentemente natural, entre el movimiento rectilíneo y el circular sobre la que Aristóteles apoyaba su hipótesis. «Ésta es la piedra angular, base y fundamento de todo el edificio del universo aristotélico... Cuando se descubre algún defecto en el cimiento, es razonable dudar de la solidez de todo lo que sobre él se ha construido.»[10]

Salviati, el interlocutor de Galileo, argumenta que, en un universo bien ordenado, el movimiento rectilíneo no puede ser natural porque lo que se mueve en línea recta no está en su lugar adecuado cuando comienza a moverse, y si continúa moviéndose siempre, tendrá un destino indefinido. Sólo el movimiento circular preserva el orden cósmico manteniendo los cuerpos en movimiento en la misma posición relativa. Se sigue que lo que no se mueve naturalmente en círculo, deberá estar naturalmente en reposo. En el nuevo modelo, el movimiento natural en línea recta pierde su posición privilegiada y, después de la Segunda Jornada, en que Salviati demuestra que la trayectoria de un cuerpo que cae desde una torre es en realidad circular, desaparece totalmente. Esto es una sobrecompensación del énfasis exagerado de Aristóteles sobre la naturalidad del movimiento rectilíneo. El triunfo de la circularidad es complejo, pero se obtiene al precio de excluir la posibilidad de la inercia rectilínea.

Como se suponía que la inmutabilidad e incorruptibilidad de los cielos procedían de su perfecto movimiento circular, ahora que todos los cuerpos están naturalmente dotados de movimiento circular, se sigue que:

> o bien la tierra en sí no es generable ni corruptible, como los cuerpos celestiales, o bien los cuerpos celestiales, como los elementales, son generables, alterables y etc., o bien esta diferencia de los movimientos nada tiene que ver con la generación ni con la corrupción.[11]

10. Galileo. *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano* (Florencia, 1632), *ibid.*, Vol. VII, p. 42.
11. *Ibid.*, p. 63.

Simplicio, el aristotélico, intenta salvar la inmutabilidad del cielo presentando un eterno argumento: el movimiento circular no tiene opuesto y la corrupción presupone movimientos opuestos. Salviati rechaza con impaciencia este razonamiento, pero Sagredo interviene para demostrar que la noción misma de que los cielos son incorruptibles implica que están sujetos a la corrupción. Si los cuerpos celestes son incorruptibles, deben poseer sus opuestos en la naturaleza, y éstos sólo pueden ser cuerpos que posean la cualidad opuesta. Pero allí donde hay oposición, es posible la corrupción. Simplicio afirma que esto es un sofisma: la oposición se produce entre elementos y no entre cuerpos celestes. ¿Se puede hallar oposición en el cuerpo corrupto o se trata simplemente de una relación?, pregunta Sagredo. Simplicio contesta que es una relación, pero que postula algún contacto entre los cuerpos. Esto es imposible en los cuerpos celestes, que pueden influir sobre los cuerpos inferiores pero no pueden ser influidos por ellos. Sagredo, impertubable, argumenta que la oposición entre los movimientos ascendentes y descendentes depende de la oposición entre ligero y pesado que, a su vez, depende de la oposición entre rareza y densidad. Pero se encuentran rareza y densidad en los cielos, donde se dice que las estrellas son las partes más densas de la materia celeste. Simplicio también tiene una respuesta. La rareza y la densidad dependen, en la tierra, de las cualidades primarias del calor y el frío; pero en el cielo son el mero resultado de la mayor o menor cantidad de materia. ¿Cómo sabe Simplicio que la rareza y la densidad en el cielo no dependen del calor y del frío? «Lo sé», replica, «porque estas cualidades no existen entre los cuerpos celestes». Sagredo ha demostrado el punto: Simplicio «sabe» porque *cree* en la coherencia del sistema aristotélico. La implicación es que todos los filósofos escolásticos se conducen de esta manera.

Simplicio cambia de posición y dice que el cielo es inmutable porque jamás se ha observado en él un cambio. Salviati contraataca. Si el empirismo ingenuo fuera normativo, ¿cómo podría afirmar Simplicio, habiendo visto sólo Europa, que China y América están sujetas al cambio? Si el mar Mediterráneo había sido creado, como muchos sostenían, por aguas del Atlántico que se habían precipitado a través del estrecho de Gibraltar, la inundación se podría haber observado desde la luna. Pero, obviamente, la tierra estaba evidentemente sujeta a la generación y a la corrupción antes de que esto sucediera. Entonces, ¿por qué no podía ser la luna igualmente corruptible aunque la humanidad no hubiese logrado registrar ningún cambio apreciable? Los *novae* de 1572 y 1604, y las manchas solares, añade Salviati, son prueba irrebatible de que se producen cambios en los cielos. Pero Simplicio descarta esta última observación con adecuadas hipótesis *and hoc*: la erupción ocasional de manchas en la superficie del sol, dice, se puede explicar mediante astros pequeños o vapores que se agrupan casualmente entre la tierra y el sol.

Sagredo manifiesta que toda la conversación se apoya en la suposición gratuita de que lo inmutable es perfecto. Se llama preciosos a los metales muy duros porque son raros; pero si la tierra fuera una masa helada sólida sería un bulto inútil en el universo. Simplicio no discute que el cambio sobre la tierra es bueno, pero niega que tenga sentido en los cuerpos celestes, «que no tienen otro uso previsto aparte de servir a la tierra, y nada necesitan aparte de luz y movimiento para cumplir ese fin», porque:

> claramente vemos y tocamos con la mano que todos los cambios, generaciones, etc., que ocurren en la tierra están mediata o inmediatamente dirigidos al uso, la comodidad y el beneficio del hombre... ¿De qué utilidad podrían ser para la raza humana las generaciones que pudieran existir en la luna o en otros planetas?[12]

A la luz de esta concepción antropocéntrica, Simplicio apela a la experiencia y al principio de economía[13] para defender el carácter inmutable del cielo. Esto se podía refutar negando que el hombre fuera el centro de todas las cosas o postulando la existencia de seres humanos en la luna. Sagredo prefiere repudiar en bloque la suposición antropocéntrica. Aunque es verdad que sólo podemos imaginar lo que ya hemos visto o algún compuesto de cosas antes experimentadas, no deberíamos dejar que nos encadenara nuestro limitado conocimiento cuando pensamos en escala cósmica.

> De este modo, podría ser que en la luna, separada de nosotros por una distancia tan grande y quizá hecha de un material muy diferente que la tierra, existieran sustancias y ocurrieran hechos no meramente remotos sino totalmente más allá de nuestra imaginación.

Sagredo compara nuestras especulaciones acerca de la luna con el tipo de fantasía intelectual que podría formular una persona que nunca ha visto un lago o una corriente, si se le dice que los animales se mueven sin alas y sin patas en un mundo hecho de agua. En tales circunstancias, es más fácil rechazar hipótesis que confirmarlas.

> Me parece que podemos determinar algunas de las cosas que pueden o no existir sobre la luna; pero no hay una sola que yo pueda creer, salvo en términos muy generales, que está o pueda estar verdaderamente allí.[14]

Pero si éste es el caso, ¿cómo se puede demostrar la falsedad de la impe-

---

12. *Ibid.*, pp. 84-85.

13. «*Natura nihil frustra facit*» dice Simplicio (*ibid.*, p. 85). Galileo se burla del saber libresco de los aristotélicos poniendo en boca de Simplicio frases y palabras latinas, práctica que evitan sus interlocutores. Cuando Salviati utiliza un axioma aristotélico para sus propios fines, lo cita o parafrasea en italiano.

14. *Ibid.*, p. 86.

netrable materia celestial de los aristotélicos? Galileo reconoce que lo único posible es ponerla en ridículo, como en el siguiente intercambio entre Sagredo y Salviati:

> Sagr.: ¡Qué excelente materia, el cielo, si alguien pudiera apoderarse de ella para construir un palacio! ¡Tan dura y tan transparente!
>
> Salv.: Una materia terrible, más bien, que es completamente invisible por su extremada transparencia. No se podrían recorrer las habitaciones sin grave riesgo de llevarse por delante las columnas y romperse la cabeza.
>
> Sagr.: No habría tal riesgo si fuera, como dicen algunos peripatéticos, intangible. No se la puede tocar, y menos aún chocar con ella.
>
> Salv.: Eso no sería un consuelo. Aunque no se pueda tocar la materia celestial porque carece de propiedades tangibles, ella sí puede tocar a los cuerpos elementales. Y nos haría tanto daño, o más, si chocara contra nosotros, que si nosotros chocáramos con ella.

Más interesante que la corrosiva sátira de Sagredo y Salviati es el comentario de Simplicio: «El punto que habéis tocado incidentalmente es uno de los problemas difíciles de la filosofía».[15] Ese punto era, por supuesto, perfectamente sensato y legítimo dentro del marco de referencia aristotélico, pero ridículo en el nuevo esquema conceptual. No se debía mirar el mundo únicamente a través del telescopio, sino también a través de una nueva serie de categorías intelectuales.

El nuevo mundo

Si el universo es verdaderamente uno, es posible saber algo acerca de la luna y de los planetas, cuando muestran analogías con acontecimientos familiares de la tierra. En el nuevo modelo galileano, las similaridades entre la tierra y la luna adquieren rango epistemológico. Se torna posible inferir que la luna es dura, opaca y esférica; y lo que es más importante, que la luna y la tierra se iluminan recíprocamente. Esto explica la luz secundaria de la luna, que era un desconcertante fenómeno en el modelo ptolemaico. También se puede demostrar que los dos cuerpos se eclipsan entre sí, lo que explica el matiz rojizo de la superficie lunar durante los eclipses, que era un problema igualmente fastidioso en la vieja cosmología.

Pero, ¿es necesario llegar a tal extremo?, pregunta Simplicio. ¿Acaso no se podrían adaptar los nuevos datos al viejo marco de referencia, postulando que la luna refleja la luz porque su superficie está muy pulida, que la luz secundaria se debe a la luminosidad intrínseca, y que la aparente anfractuosidad de su superficie se debe a las diversas densidades de

15. *Ibid.*, p. 94.

sus partes? Salviati concede que estas hipótesis son posibles; pero se deben poner a prueba deduciendo las consecuencias observacionales que implican, y confrontándolas con la experiencia. Por lo tanto, se debe descartar la analogía entre la luna y un espejo puesto que los fenómenos observados en la luna no se pueden reproducir con espejos planos ni esféricos. Sin embargo, esto se puede hacer haciendo girar una bola oscura con prominencias y depresiones de tamaño proporcional a las de la luna.

> De las incontables apariencias distintas que se revelan noche tras noche durante una luna, no podrías imitar una sola construyendo, según tu idea, una bola hecha de varias partes más o menos opacas o transparentes, y con la superficie pulida. Y por el contrario, una bola hecha de cualquier material sólico y opaco representará exactamente las escenas y cambios que se ven en la luna de hora en hora sólo con que tenga prominencias y depresiones y esté iluminada de manera cambiante.[16]

Los modelos son instrumentos, y si bien es necesario establecer su relevancia, no menos importante es determinar cuándo dejan de funcionar. Simplicio pone este asunto en primer plano cuando pregunta a Salviati hasta dónde pretende extender el paralelo entre la tierra y la luna. ¿Acaso diría, por ejemplo, que las grandes manchas de la luna son mares? Salviati replica con una breve conferencia sobre los modelos y las analogías:

> Si, en la naturaleza, la única forma de que dos superficies pudieran ser iluminadas por el sol de modo que una pareciese más brillante que la otra fuera hacer una de tierra y la otra de agua, sería necesario decir que la superficie de la luna es en parte de tierra y en parte de agua. Pero como se conocen varias otras maneras de producir estos mismos efectos, y quizás haya otras de las que no tenemos conocimiento, no seré tan osado como para hacer esa afirmación.

Sin embargo, Salviati está seguro de que las partes más oscuras son llanuras y las más claras, cadenas montañosas, porque «el límite que separa las partes claras y oscuras forma un perfil neto cuando atraviesa las manchas, y parece roto e irregular sobre las partes claras».[17]

El modelo tiene otras limitaciones. Salviati explica que la vida en la luna sería distinta de todo lo que conocemos a causa de las diferentes condiciones del clima. En primer término, un día lunar equivale a un mes terrestre, y ninguna planta o animal de la tierra podría sobrevivir a quince días de calor incesante y abrasador. Luego, los cambios estacionales, considerables en la tierra a causa de la variación de 47° en la sali-

16. *Ibid.*, pp. 111-112.
17. *Ibid.*, pp. 124-125.

da y la puesta del sol, serían mucho menores en la luna donde esa variación es sólo de 10°. Finalmente, en tanto que los océanos cubren gran parte del globo terrestre, en la luna no debe haber agua puesto que no hay nubes. Sagredo sugiere que sería posible superar esta última dificultad imaginando tormentas o un fuerte rocío durante la noche. Nuevamente, la respuesta de Salviati es instructiva:

> Si por otros hallazgos tuviéramos indicios de que hay allí especies similares a la nuestra, y de que sólo faltan las lluvias, podríamos ser capaces de hallar uno u otro medio de reemplazarlas, como ocurre en Egipto con las inundaciones del Nilo. Pero no hallando ninguna propiedad que concuerde con las nuestras entre las muchas que se requerirán para producir efectos similares, no tiene sentido fatigarse por introducir una sola, que por añadidura no procede de una observación segura sino que es una mera posibilidad.[18]

En la física aristotélica, no se consideraban válidos los modelos terrestres porque, según se afirmaba, los cuerpos celestes estaban formados por una sustancia enteramente diferente de cualquier sustancia de la tierra. En el cosmos unificado de Galileo, se podían utilizar analogías con objetos familiares para explicar propiedades de la luna y los planetas, y además estaban explícitas las limitaciones de este método. La prudencia de Galileo no parece proceder tanto del deseo de experimentación cuidadosa como de una convicción matemática: los modelos visuales son, por sí solos, insuficientes para producir el conocimiento adecuado.

Galileo nunca pone en duda la existencia del movimiento «natural»; pero éste adquiere un significado totalmente nuevo. Según el paradigma biológico y teleológico de los aristotélicos, el movimiento natural revelaba la dicotomía básica del universo entre la tierra, imperfecta y siempre cambiante, y los cielos perfectos e inalterables. En la nueva cosmología de Galileo, el movimiento natural –que sólo puede ser el circular– mostraba la unidad fundamental del universo. Galileo supone que todos los cuerpos móviles obedecen a las mismas leyes, y que toda clase de cambio, ya sea accidental o sustancial, es sólo una reorganización de la materia en movimiento. Con este punto de vista era más fácil conocer la trayectoria de los planetas en el cielo que la naturaleza de la generación y la corrupción en la tierra. El supuesto subyacente era que todos los cuerpos se mueven en trayectorias que se pueden describir matemáticamente y se disponen en formas geométricas. Simplicio siente sincero desconcierto ante esta nueva forma de razonar:

> Atribuye esto, por favor, a mi falta de práctica en las ciencias matemáticas; pero te digo libremente que tus argumentos, fundados en proporciones

18. *Ibid.*, p. 126.

> mayores y menores y en otros términos que no comprendo suficientemente, no han suprimido mis dudas o, mejor dicho, mi incredulidad.[19]

¿Cómo puede una bola de plomo –pregunta en seguida– pasar por *todos* los grados de velocidad cuando cae más de cien codos en cuatro latidos del pulso? Sagredo acude en su ayuda con un ejemplo: cuando se lanza verticalmente hacia lo alto una bala de cañón, reduce su velocidad hasta que llega al punto más elevado, y luego vuelve a acelerarla en su descenso. Pero, para alcanzar la velocidad cero justamente antes de empezar a descender, debe atravesar todos los grados de velocidad entre la velocidad inicial y la velocidad cero. Simplicio queda satisfecho: «Puedo comprender ese argumento con mucha mayor facilidad que las anteriores sutilezas matemáticas». La ironía está apenas disfrazada. Quien no logra comprender el significado del razonamiento matemático, agradece los ejemplos.

Salviati destaca que sólo se puede obtener el conocimiento auténtico mediante las matemáticas. Aristóteles estaba en lo cierto al afirmar que los cuerpos son tridimensionales, pero habría sido mejor que lo demostrara en lugar de apelar al consenso de los pitagóricos y a la conveniencia del número tres:

> No creo, por ejemplo, que el número tres sea más perfecto para patas que el dos o el cuatro, ni que el número cuatro sea imperfecto para los elementos o que sería más perfecto que el tres. Hubiera sido mejor que Aristóteles dejara estas vaguedades a los retóricos y probara su punto de vista con demostraciones rigurosas, como exigen las ciencias demostrativas.

Simplicio expresa asombro y desaliento. ¿Cómo puede Salviati –un matemático– ridiculizar la opinión de los pitagóricos? La sorpresa de Simplicio sirve a dos fines. Primero, revela el marco autoritario de los aristotélicos, una actitud intelectual que Galileo siempre denuncia con regocijo. Simplicio considera las diferencias de criterio como episodios ocurridos entre escuelas de pensamiento combatientes. Se considera –y también considera así a los demás– miembro de una escuela, discípulo de un antiguo maestro. En segundo lugar, la reacción de Simplicio proporciona a Galileo la oportunidad de distinguir entre la veneración a Pitágoras de los matemáticos y la de los astrólogos y alquimistas.

> Sé muy bien que los pitagóricos tenían en alta estima la ciencia de los números, y que el mismo Platón admiraba el intelecto humano, que consideraba parte de la divinidad sólo porque comprendía la naturaleza de los números. Yo no estaría lejos de hacer el mismo juicio. Pero de ningún modo creo que los misterios por los cuales Pitágoras y su secta sentían tal admi-

19. *Ibid.*, p. 54. Este pasaje fue agregado por Galileo en su copia del *Diálogo*.

> ración por la ciencia de los números fueran esas tonterías que tanto abundan en los dichos y escritos del vulgo.[20]

Esta afirmación, expuesta al principio mismo de la Primera Jornada, da el tono de todo el *Diálogo*. Galileo rechaza el místico malabarismo con los números de la seudociencia, pero no duda de que el intelecto humano participa de la divinidad en la medida en que comprende las matemáticas, el lenguaje de la naturaleza.

Luego Salviati demuestra que los cuerpos no pueden tener más de tres dimensiones porque no se pueden trazar más de tres rectas en ángulo recto entre sí (figura 14). Simplicio no advierte el carácter necesario del argumento. Sugiere que se podrían agregar otras dos rectas prolongando *AB* y *AD*, y Sagredo señala que esas extensiones seguirían perteneciendo a las mismas rectas. Simplicio carece de la preparación elemental que podía permitirle pensar con rapidez y coherencia, cualidades que sólo se pueden adquirir mediante el estudio de las matemáticas. «El arte de la demostración se aprende leyendo libros que contienen demostraciones. Y éstos son tratados matemáticos, y no libros de lógica».[21]

Al final de la Primera Jornada, cuando el empleo de las matemáticas ha sido reivindicado de diversas maneras, Salviati regresa al tema del conocimiento matemático «divino». La mente humana es limitada en muchos sentidos, pero puede alcanzar la certidumbre:

> De las ciencias matemáticas puras, es decir, la geometría y la aritmética, el intelecto divino sabe infinitas proposiciones más, puesto que las conoce todas; pero creo que el conocimiento del intelecto humano –en cuanto a las pocas que comprende– es igual al divino en certidumbre objetiva, puesto que logra comprender su necesidad.[22]

Para Dios la aprehensión de la esencia de una cosa significa la comprensión inmediata, sin razonamiento temporal, de todas sus infinitas implicaciones; pero el hombre debe abrirse paso de una conclusión a la siguiente. Sin embargo, la unidad de todas las cosas en la mente de Dios *«no es enteramente desconocida para el intelecto humano, aunque está sombreada por una profunda nebulosa»*.[23] Esta se clarifica cuando se logra dominar tan firmemente una proposición matemática que es posible recorrerla fácil y rápidamente. La mente humana reúne pieza por pieza lo que el intelecto divino percibe como un relámpago.

---

20. *Ibid.*, p. 35.
21. *Ibid.*, p. 60.
22. *Ibid.*, pp. 128-129.
23. *Ibid.*, p. 129, cursivas del autor.

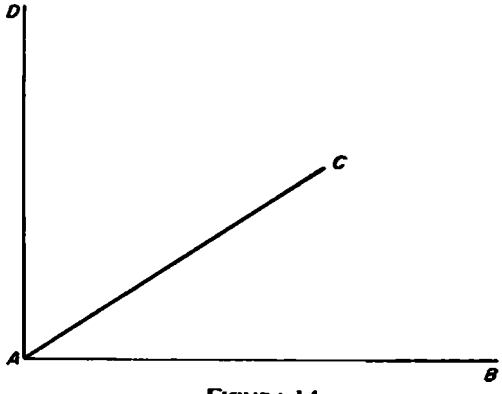


FIGURA 14

Galileo debía en parte esta idea al platonismo, que era popular en Italia y en especial en Florencia, desde el siglo XV. Como destaca E. A. Burtt, la estructura matemática que hace posible la ciencia arraiga, en último análisis, en una interpretación religiosa del mundo. «Dios, con su inmediato conocimiento creativo de la naturaleza, introduce en el mundo, pensando, esa rigurosa necesidad matemática que nosotros sólo alcanzamos laboriosamente por medio de resoluciones y demostraciones. Dios es un geómetra en sus tareas creativas: construye en el mundo mediante un sistema matemático».[24] Esta es la base de su filosofía que permite la osadía de Galileo cuando declara en una carta a la Gran Duquesa Cristina que algunos pasajes dudosos de las Escrituras deberían interpretarse a la luz de la ciencia, y no al contrario.

> Me parece que, al discutir los problemas naturales, no deberíamos partir de la autoridad de los pasajes de la Escritura, sino de la experiencia sensorial y las demostraciones necesarias. La Sagrada Escritura y la naturaleza proceden igualmente del Verbo divino... No todo lo que se dice en la Biblia está regido por normas tan estrictas como aquellas que gobiernan los hechos naturales, y tanto éstos como los sagrados pronunciamientos de la Escritura revelan a Dios con idéntica excelencia.[25]

La concepción galileana de la naturaleza implica una revolución en los supuestos mismos del pensamiento acerca del mundo. Contra los aristotélicos, que descartan las matemáticas como fútiles e irrelevantes, afir-

24. E. A. Burtt, *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science*, 2a. ed. revisada, (ed. Routledge and Kegan Paul, Londres, 1964), pp. 71-72.

25. Galileo, *Lettera a Madama Christina di Lorena* (1615), *Opere di Galileo*, Vol. V, pp. 316-317.

ma que esta ciencia es el aspecto divino del intelecto humano. Una implicación es obvia: los aristotélicos han ignorado durante siglos el principio divino del hombre. Salviati estima que ha llegado el momento de investigar la génesis del mundo real. Esto no significa realizar nuevos experimentos sino impulsar con toda energía la teoría «matemática», generalmente atribuída a Platón, acerca del origen del universo.

Ya hemos visto que para establecer un cosmos unificado, Galileo sacaba el movimiento rectilíneo de la privilegiada categoría del movimiento «natural» y lo declaraba estrictamente transicional. Sirve meramente para devolver a los cuerpos a su lugar natural, desde donde continuarán espontáneamente su movimiento circular. A menos, como sugiere Salviati,

> que tengamos el deseo de decir, con Platón, que incluso los cuerpos cósmicos, después de su creación y de su estabilización completa, han sido movidos durante cierto tiempo en línea recta por su Hacedor, y que al llegar a ciertos puntos predeterminados, fueron puestos uno por uno en rotación, pasando así del movimiento rectilíneo al circular, en el que se mantuvieron y aún se mantienen. Un pensamiento sublime muy digno de Platón, sobre el que recuerdo haber oído discurrir a nuestro amigo el Académico Linceano.[26]

Suponiendo que todos los globos fueron creados en el mismo sitio y cayeron hasta alcanzar la velocidad adecuada a su órbita cuando su movimiento pasó de rectilíneo a circular, el Académico sugería que era posible determinar el punto de partida común a partir de las dimensiones de sus órbitas y de sus períodos de revolución. Suponiendo que Marte, la Tierra, Venus y Mercurio habían caído del mismo lugar, se podían calcular sus órbitas y períodos y confrontarlos con los datos observables. Salviati declara que los resultados «concuerdan tan estrechamente con los del cálculo que causa asombro». Sagredo se alegra, pero sospecha que los cálculos son largos y aburridos. «La tarea es verdaderamente larga y difícil –dice Salviati– y no estoy seguro de que pueda reconstruirla de inmediato. Por lo tanto, la dejaremos para algún otro momento.»[27]

Mersenne hizo realmente esos cálculos en su *Harmonicarum Libri*, demostrando la falsedad de la concepción expuesta por Galileo.[28] Los planetas no habían partido del mismo lugar. ¿Fue esto meramente una broma, «*un capriccio et una bizzarria, cioè jocularis quaedam auda-*

26. Galileo, *Diálogo, ibid.*, p. 44.
27. *Ibid.*, p. 54.
28. Marin Mersenne, *Harmonicarum Libri* (Paris, 1636), t. I. Praefatio, prop., 2 (sin foliar) donde se refiere a los detallados cálculos de su *Harmonie Universelle*. Seconde Partie, Traitez de la nature des sons, et des mouvements de toutes sortes de corps (ed. Pierre Baillard, Paris, 1637), pp. 103-107.

cia», como escribió Galileo a Pierre Carcavy?[29] Emil Strauss, en su traducción del *Diálogo*, lo sugiere; pero no hay duda de que era una especulación seria (así como lo era también, probablemente, la teoría circular) para explicar la estructura del sistema planetario. En primer lugar, Galileo no sólo la menciona dos veces en la Primera Jornada del *Diálogo*, sino que retoma la idea en la Cuarta Jornada del *Discurso acerca de dos nuevas ciencias*; en segundo lugar, afirma que es pasible de tratamiento matemático; y finalmente, lo que es tal vez más decisivo, atribuye el punto de vista al Académico, es decir, a él mismo. Cuando Salviati se refiere al Académico siempre es para destacar que él fue el primero en realizar un descubrimiento importante.

No hay duda de que Galileo ansiaba vincular su especulación con el nombre de Platón. Pero nadie ha logrado encontrar el pasaje donde Platón describe esa idea cosmológica que se le atribuye.[30] Además, si se mira con más detenimiento, parecería que Galileo mismo no afirma que él se ha limitado a descubrir la cosmología platónica. Salviati dice específicamente en el *Diálogo* que desea «adornar un concepto platónico» y, en los *Discursos*, Sagredo repite la misma expresión: *«mi par che convenga adornar questo pensiero dell'Autore con la conformità del concetto di Platone»*.[31] Por lo tanto, en ambas obras se nos dice que el Académico ha «embellecido, desarrollado la sublime idea de Platón, saltando a su propia concepción».[32] Sagredo, que parece tan claro cuando atribuye a Platón ciertos aspectos característicos de la doctrina, añade que Platón sólo la mostraba cubierta con una máscara, como una alegoría poética, y que el Académico ha revelado los fundamentos sobre los cuales Platón guardaba silencio.

> Este pensamiento es verdaderamente digno de Platón, y debe ser tanto más apreciado ahora que sus principios básicos (acerca de los cuales Platón guardaba silencio, y que han sido descubiertos por nuestro Autor,

29. Carta a Pierre Carcavy, *Opere di Galileo*, Vol. XVII, p. 89.

30. «Por sublime que sea, esa teoría no está en Platón» (Alexandre Koyré, *Newtonian Studies* [ed. Chapman and Hall, Londres, 1965], p. 218). El pasaje del *Timeo* 38-39 sólo es una remota analogía de lo que afirma Galileo. Tampoco se puede decir que el texto 30a estudiado por Aristóteles (*Acerca de los cielos*), libro 3, cap. 2, 300b 16) tenga una relación más estrecha. Marin Mersenne escribió a Niccolò Fabri de Peiresc el 4 de diciembre de 1634 pidiéndole que preguntara a Gassendi o a alguien más dónde dice Platón lo que Galileo le atribuye (Cornelis de Waard, ed., *Correspondence du P. Marin Mersenne*, Vol. IV [ed. Vrin, Paris, 1955], pp. 403-404). Peiresc respondió el 19 de diciembre de 1634 que Gassendi «n'a pas de souvenance d'en avoir rien leu dans le texte mesmes de Platón, lorsqu'il en a fait la lecture de bout à aultre de toutes les pièces qui s'en trouvent assemblées en un corps, et faut que ce soit dans quelque aultre autheur ancien qui l'aye veu en d'aultres oeuvres de Platón de celles qui ne se trouvent plus, dont il faudra faire la recherche plus à loysir» (*ibid.*, p. 415).

31. Galileo, *Dialogo*, *Opere di Galileo*, Vol. VII, p. 53; *idem*, *Discorsi*, *ibid.*, Vol. VIII, p. 283.

32. Koyré, *Newtonian Studies*, p. 219.

quien les ha quitado su máscara poética) lo revelan como realmente es (*lo scuoprono in aspetto di verace istoria*).[33]

Si la teoría pertenece a Galileo, ¿por qué la presentaba como platónica? ¿Sólo por diversión daba a una idea ingeniosa un nombre de prestigio y la presentaba como propia de un gran filósofo? Esto contradice vigorosamente cuanto sabemos acerca del espíritu independiente de Galileo y de su firme repudio a la autoridad en la ciencia. Si atribuye a Platón la concepción es porque está convencido de que en sus escritos se encuentra al menos el germen de la idea. Más específicamente, intenta demostrar –y de aquí la insistencia en los cálculos– que la auténtica ciencia platónico-pitagórica explica la verdadera estructura del universo y proporciona la historia real de su origen. Éste es también el origen de una afirmación de Sagredo en los *Discursos:* el Académico ha descubierto *la verace istoria* levantando el velo poético, disipando la nebulosidad que rodea el conocimiento humano. Las matemáticas dispersan la bruma del desconocimiento y permiten a la mente humana el ascenso hasta el umbral mismo de la eternidad. No es ya el filósofo, sino el matemático, quien puede aspirar a ser un visionario.

Si esta interpretación es correcta, encontramos otro problema: la afirmación que Salviati formula en el *Diálogo* y repite en los *Discursos* de que el Académico ha estudiado las órbitas y los períodos de los planetas a partir de la suposición de que todos han caído desde un mismo punto. ¿Realizó los cálculos Galileo o se limitaba a exponer una brillante idea matemática? Si examinamos el contexto correspondiente de la Primera Jornada del *Diálogo*, veremos que, justamente antes de recordar la especulación platónica del Académico, Salviati establece como una ley natural «que la naturaleza, al conferir una velocidad precisa a un cuerpo constituido inicialmente en la inmovilidad, le otorga un movimiento recto a lo largo de cierto tiempo y espacio». Ahora bien: Dios, excepto en el caso de los milagros, no rompe las leyes del mundo que ha creado. Por lo tanto, la adopción de la cosmología «platónica», es decir, la introducción del movimiento rectilíneo antes que el circular para los planetas, procura a Dios una economía de acción sobrenatural. Es importante destacar este hecho porque, desde el punto de vista de la física newtoniana, que naturalmente adoptamos, lo cierto es lo contrario. Para Newton, la cosmología platónica no determina ninguna ventaja.[34] Supone, en cambio, dos tremendos milagros. En primer lugar, el cambio instantáneo de la dirección del movimiento de los planetas que caen, tan difícil de producir como dar instantáneamente una velocidad determinada a un cuerpo. En verdad, en el orden natural de las cosas, esto es im-

33. Galileo, *Discorsi, Opere di Galileo*, Vol. VIII, p. 284.
34. En relación con el análisis que sigue ver Koyré, *Newtonian Studies*, pp. 215-220.

posible. En segundo lugar, implica que la atracción solar se duplica en el preciso instante en que el movimiento hacia abajo es reemplazado por le movimiento circular. Para Galileo, ninguna de estas consideraciones podía tener sentido. Consideraba que la operación de dar movimiento a un cuerpo inmóvil difería totalmente de la necesidad para cambiar su dirección. En el primer caso, era necesario producir algo nuevo; en el otro, el cambio era meramente accidental. Y Galileo no tenía ninguna necesidad de la duplicación de la atracción porque el movimiento circular era inercial y no engendraba fuerzas centrífugas, de modo que no se requería la atracción solar para que los planetas describieran sus órbitas y permanecieran en ellas. Además, Galileo no razonaba sobre el supuesto de que el sol atrae a los planetas: éstos se movían hacia el sol en virtud de una tendencia originada en sus cuerpos.

A la luz de estos principios, que niegan la posibilidad de sospechar siquiera la evidente dificultad de la física newtoniana, y teniendo en cuenta la fe de Galileo en el poder explicativo de las matemáticas, parece probable que no haya realizado los cálculos que menciona. Probablemente sólo se trató del presentimiento, que para él rayaba en la certidumbre, de que si alguien se tomaba la molestia de estudiar las trayectorias y los períodos de los planetas, descubriría que la conjetura se justificaba. Salviati en el *Diálogo* y Sagredo en los *Discursos* anticipan la importancia del descubrimiento del Académico. El orgullo de Galileo equipara su genio. En las dos cosas era capaz de excesos. ¿Cómo, de otro modo, podríamos explicar su jactancia de que el Académico «hizo los cálculos y halló que correspondían precisamente a las observaciones», y la seguridad con que escribe: «Si alguien quisiera hacer lo mismo, podrá satisfacer su curiosidad mediante la doctrina del presente tratado?»[35]

35. Galileo, *Discorsi, Opere di Galileo*, Vol. VIII, p. 284.

6

EL MUNDO EN MOVIMIENTO: LA SEGUNDA Y TERCERA JORNADAS DEL *DIÁLOGO*

La Primera Jornada del *Diálogo* derribó la dicotomía aristotélica entre cuerpos celestes y terrestres y estableció que el cielo y la tierra pertenecían al mismo sistema cósmico. El paso lógico siguiente era preguntar si la tierra se mueve, y a este problema se dedican las otras tres jornadas del *Diálogo*. En la Segunda Jornada, se estudia la rotación diurna de la tierra, y en la Tercera, su revolución anual en torno del sol. La Cuarta Jornada intenta demostrar que sólo si se aceptan estos movimientos se puede explicar adecuadamente el fenómeno de las mareas.

EL MOVIMIENTO DIURNO DE LA TIERRA

Las objeciones clásicas

La Segunda Jornada se inicia con la afirmación de que el movimiento de la tierra, si existe, ha de ser totalmente imperceptible para sus habitantes. Por consiguiente, la opinión se orienta a lo más plausible, y Salviati, hablando en nombre de Galileo, sostiene que más fácil es creer que la tierra gira sobre su eje y no que todos los planetas y estrellas giran en torno de la tierra.

> ¿Quién creerá que la naturaleza (que, según acuerdo general, no hace mediante muchas cosas lo que puede hacer con pocas) haya elegido que un inmenso número de cuerpos vastísimos se muevan a velocidades incalculables para hacer lo mismo que se hubiera conseguido con el movimiento moderado de un solo cuerpo sobre su propio eje?[1]

El movimiento diurno de la tierra podía eliminar una multitud de complejidades del sistema geocéntrico. Primero, la anomalía de una esfera

1. Galileo. *Dialogo, Opere di Galileo.* Vol. VII, p. 143.

celeste de estrellas que se movía hacia el oeste cuando todos los planetas se dirigían hacia el este. Por otra parte, podía explicar las variaciones aparentes en las órbitas y períodos de las estrellas evitando, además, las esferas cristalinas sólidas que transportan a las estrellas en el sistema ptolemaico.

Salviati ansía que Simplicio reconozca que la sencillez es el principio regulador que lo guía en la interpretación de los datos astronómicos. Simplicio acepta: «Me parece que fundas tu caso en la mayor comodidad y sencillez para producir los mismos efectos».[2] No discute el principio general, pero sostiene que Dios, por ser omnipotente, debía mostrar naturalmente la variedad infinita de su poder al crear el mundo. No hay desacuerdo acerca del principio de simplicidad en sí; la dificultad proviene de sus aplicaciones.

En el debate posterior, se reiteran las objeciones «clásicas» contra la rotación axial de la tierra: una piedra rrojada de una torre no tocaría el suelo en su base sino a cierta distancia al oeste; las balas de cañón disparadas hacia el oeste llegarían más lejos que las disparadas hacia el este; soplaría constantemente un poderoso viento del este; la fuerza centrífuga de la rotación arrojaría al aire árboles y casas.

Salviati señala que todos estos trillados argumentos se apoyan en la misma falacia:

> El error de Aristóteles, Ptolomeo, Tycho y todos los demás, arraiga en la impresión fija e inveterada de que la tierra está quieta. No puedes o no sabes despojarte de ella, ni siquiera cuando quieres imaginar qué ocurriría si la tierra se moviera.[3]

La idea de una tierra estática está tan firmemente enclavada en la imaginación de los aristotélicos que, cuando oyen decir que se mueve, «neciamente suponen que empezó a moverse cuando Pitágoras (o quien fuera) dijo por primera vez que se movía».[4] El procedimiento correcto e indispensable era el reemplazo del marco de referencia ptolemaico por el copernicano. «Cualquiera que lo haga discernirá sin dificultad alguna la falacia y la equivocación que tornaban en apariencia concluyentes los argumentos presentados»,[5] dice Sagredo.

La dificultad de razonar con independencia a propósito de una imagen familiar es en realidad mayor de lo que piensa Galileo. Cesare Marsili, uno de sus más firmes defensores, se vio atrapado por la representación gráfica tradicional del mundo cuando llegó a la conclusión de que los períodos lunares serían desiguales si la tierra girara en torno del sol.

2. *Ibid.*, p. 148.
3. *Ibid.*, pp. 196-197.
4. *Ibid.*, p. 215.
5. *Ibid.*, p. 209.

Pensaba (figura 15) que la luna completaba una revolución cuando llegaba a *h* y no a *l*, de donde había partido.[6] El error estaba en suponer que la longitud del período de revolución lunar en torno de la tierra era afectado por la posición de la tierra en relación con el sol.

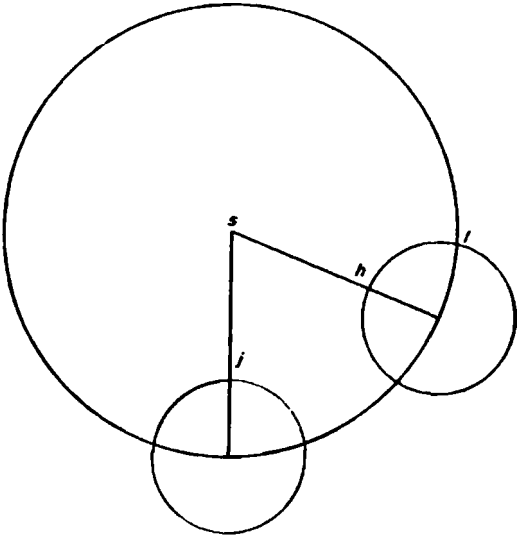


FIGURA 15

Sin embargo, Simplicio no acepta que la inmovilidad de la tierra carece de pruebas empíricas que la apoyen. Recurre al ejemplo de una piedra arrojada desde el punto más alto de un mástil de un barco en marcha: afirma que caerá tan lejos del pie del mástil como haya avanzado el barco durante la caída. Al principio, Salviati lo concede, pero tiene reservas y pregunta a Simplicio si ha sido testigo de ese experimento. Simplicio admite que no y Salviati no se muestra dispuesto a hacerlo personalmente; en cambio, somete a Simplicio al examen cruzado socrático para que él mismo descubra cuál *debe* ser el resultado del experimento. Este método circular es característico de la técnica de Galileo en todo el *Diálogo*. Pregunta inicialmente a Simplicio cómo debe ser el movimiento de una bola perfectamente redonda sobre una superficie perfectamente lisa.

6. Carta de Bonaventura Cavalieri a Galileo, 18 de noviembre de 1631, *ibid.*, Vol. XIV, pp. 308-309.

> Dime ahora –pregunta Salviati– ¿cuál es a tu juicio la causa de que una bola se mueva espontáneamente en un plano inclinado hacia abajo, pero sólo mediante una fuerza en otro inclinado hacia arriba?

Simplicio replica:

> Porque los cuerpos pesados tienden a moverse hacia el centro de la tierra, y sólo por la fuerza hacia lo alto de la circunferencia.[7]

De esto se deduce que una bola colocada sobre una superficie plana no tiene tendencia a moverse ni resistencia a ser movida; y que si se pone en movimiento, su velocidad no acelerará ni decelerará, sino que se mantendrá indefinidamente. Éste sería, por ejemplo, el caso de un barco que recibe un impulso en un mar en calma. Se moverá a velocidad uniforme, y todas las cosas, a bordo, participarán de su movimiento. Una piedra arrojada de un palo continuará moviéndose con el movimiento de la nave y tocará la cubierta en el mismo punto en que habría caído si el barco hubiera estado inmóvil.

Simplicio ladra ante esta conclusión, no porque choque con la experiencia, sino porque es absurda en el contexto de su filosofía natural. Implica que el movimiento está contenido en el proyectil, algo, dice, «tan detestable para la filosofía peripatética como el traspaso de una propiedad accidental de un sujeto a otro».[8] Para evitar esta objetable inferencia, los aristotélicos conservadores sostenían que los proyectiles eran movidos por el medio circundante, en general, el aire. Salviati elude limpiamente esta teoría señalando que un péndulo oscila durante un período de tiempo más largo si lleva una plomada más pesada. Esto sería imposible si fuera impulsado por el aire, que no mueve más fácilmente un objeto pesado que otro ligero. El movimiento está implícito en la plomada, como antes en la piedra arrojada desde el palo de un barco en marcha.

Salviati intenta determinar con mayor detalle la trayectoria de un cuerpo en caída libre con la ayuda de la figura 16, en que *BI* es la superficie de la tierra, y *BC* la altura de una torre transportada por la tierra que describe, con su cima, el arco *CD*. Suponiendo que la aceleración sea constante y que la línea del movimiento compuesto termine en el centro de la tierra, Salviati usa *E*, el punto medio de *CA* como centro, y la longitud *EC* como radio para trazar el semicírculo *CIA*, «a lo largo del cual considero más probable que se mueva una piedra arrojada desde la parte superior de la torre».

Surgen claramente del diagrama la velocidad inicial de caída, muy

7. Galileo, *Dialogo, ibid.*, Vol. VII, pp. 173-174.
8. *Ibid.*, p. 175.

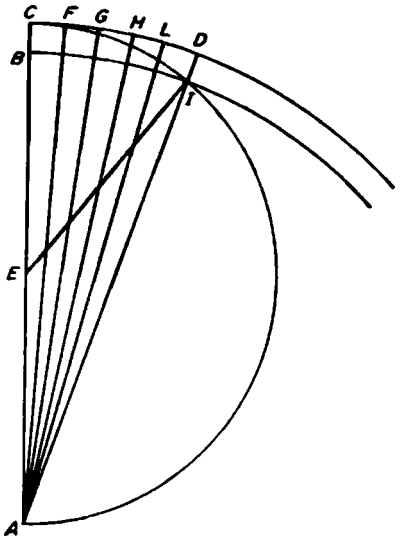


FIGURA 16

lenta, la aceleración constante y la tendencia hacia el centro de la tierra. El análisis ulterior revela otros tres aspectos sorprendentes. Primero, la piedra sigue siempre una trayectoria circular, esté en reposo o en movimiento. Esto confirma la argumentación de la Primera Jornada contra la teoría aristotélica de que el movimiento rectilíneo es una propiedad natural de los cuerpos pesados. Segundo: la distancia recorrida por la piedra al caer es igual a la que habría recorrido si hubiera permanecido en la parte superior de la torre, porque los arcos *CF, FG, GH,* y *LD* son iguales. Tercero: el movimiento real de la piedra no es acelerado sino uniforme porque atraviesa todos los arcos indicados en tiempos iguales. Sagredo, encantado, exclama:

> ¡Quisiera Dios que todas las demostraciones de los filósofos tuvieran la mitad de las probabilidades que ésta!

Pero Salviati se muestra cauteloso:

> No deseo declarar en este momento que el descenso de los cuerpos pesados se cumple exactamente de esta forma; pero si la línea descrita por un cuerpo que cae no es ésta, se encontrará muy cerca de ella.[9]

9. *Ibid.*, pp. 191-193.

En realidad, Galileo se había equivocado por exceso de confianza. Fermat estudió la trayectoria del proyectil y Pierre Carcavy transmitió sus críticas a Galileo en 1637. Galileo, que para ese momento –tal vez con la ayuda de Bonaventura Cavalieri– había deducido la trayectoria parabólica correcta de los proyectiles, intentó excusar su explicación como una broma.

> Aunque se dice en el *Diálogo* que la combinación del movimiento rectilíneo del cuerpo que cae y el movimiento uniforme diurno tal vez originan un semicírculo que termina en el centro de la tierra, esto se decía como una broma; es evidente porque se menciona como capricho y curiosidad, es decir, *jocularis quaedam audacia*. Por lo tanto, deseo que se me excuse en especial, puesto que esa ficción poética involucra tres consecuencias inesperadas.[10]

Galileo intentó convertir su renuncia a un error en apología; pero es casi seguro que la argumentación del *Diálogo* estaba planteada seriamente. De otro modo, habría dirigido su burla contra los matemáticos, y éste era un privilegio que reservaba estrictamente a los filósofos. En su urgencia por aportar nuevos testimonios contra la antítesis aristotélica entre los desplazamientos circulares del cielo y rectilíneos de la tierra, daba la bienvenida al movimiento circular allí donde lo encontraba. Pero la teoría tenía aún otra ventaja: eludía la necesidad de explicar la aceleración, ya que la velocidad absoluta de un cuerpo que cae por la trayectoria que describe Galileo es uniforme. La aceleración relativa a la superficie terrestre se torna meramente aparente y puede visualizarse como el producto del movimiento uniforme del observador y del objeto a lo largo de trayectorias circulares que se encuentran.

Otra objeción clásica al movimiento de la tierra era que un disparo de cañón lanzado hacia el oeste debía tener mayor alcance que un disparo hacia el este. Salviati reconoce la necesidad de un modelo que pudiera ponerse a prueba, y Sagredo propone montar una ballesta en un coche abierto y disparar un dardo en la dirección de marcha del coche y luego en la opuesta. Si el dardo viaja 300 brazos (*braccia*) mientras el coche cubre 100, ¿qué ocurrirá cuando se lance el dardo? Simplicio responde inmediatamente que recorrerá 200 brazos en la dirección del movimiento y 400 en la opuesta. Reconoce que las distancias se podrían igualar si la potencia de la ballesta se aumentara en el primer caso y se redujera en el segundo. Salviati señala que esto es, en realidad, lo que ocurre si la ballesta comparte el movimiento del coche. En la dirección del movimiento, el dardo recibe un ímpetu de 400 brazos y en la opuesta, de sólo 200. Pero como el coche recorre 100 brazos durante el vuelo del dardo, las

10. Carta a Pierre Carcavy, 5 de junio de 1637, *ibid.*, Vol. XVII, p. 89.

distancias se igualan. Lo mismo ocurre con los disparos de cañón lanzados de una tierra en movimiento: independientemente de la dirección en que sean disparados, caerán a la misma distancia de la boca del cañón.

Los disparos verticales se pueden interpretar del mismo modo. Suponiendo que la tierra se mueva, es verdad que una bala de cañón lanzada directamente hacia arriba se mueve a lo largo de una línea oblicua, pero el cañón de que ha partido recorre con ella la misma distancia horizontal. Esto se puede ilustrar (figura 17) con el breve período en que la bala asciende en el interior del arma. Claramente, Galileo reconoce que el movimiento vertical y el horizontal son dos componentes independientes y los trata como tales. Esto representa un gran avance conceptual: la incapacidad de comprender este principio fue la dificultad que hizo creer a Colombo que el impulso de la pólvora debía añadirse al de la rotación terrestre.

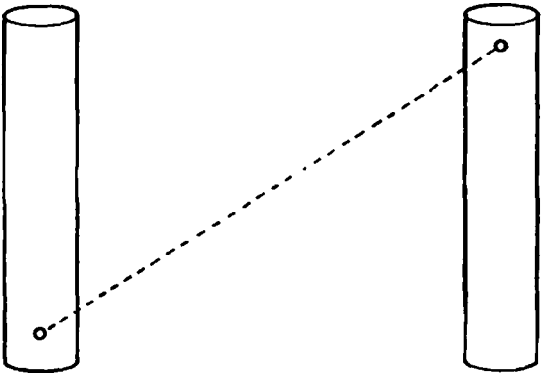


FIGURA 17

La objeción del terrible viento del este, que impediría a una bandada de pájaros regresar a su nido, no parecía exigir mayor interés, y el lector moderno suele sorprenderse al ver el énfasis que adquiere en el *Diálogo*. Debemos recordar que éste era un grave problema para los contemporáneos de Galileo y que a él mismo le había provocado algún desconcierto. Por supuesto, la solución consistía en afirmar que el aire participa del movimiento de la tierra. El vuelo de las aves se compara con el movimiento, no modificado, de los peces en una pecera que se lleva de una habitación a otra. Salviati dice que los experimentos realizados en un camarote cerrado no permiten establecer si el barco está inmóvil o se mueve a velocidad uniforme; Sagredo agrega que muchas veces se había preguntado, en su camarote, si el barco se movía; y que algunas veces había creído que se dirigían en el rumbo opuesto. Sin embargo, la super-

ficie de la tierra durante la rotación no se parece a un camarote cerrado sino a una cubierta en que sopla viento fresco. Salviati advierte el problema, y sugiere que el aire es transportado entre las montañas que cubren la tierra. También propone una interesante analogía:

> Por una razón parecida, cuando pasa el coche del correo, vemos a veces que moscas y tábanos importunos siguen a los caballos volando a uno y otro lado de sus cuerpos.[11]

La comparación no es inútil, pero ciertamente no es una explicación física. Simplicio responde que si la tierra girara como una peonza a más de mil millas por hora, árboles y casas, mares y ciudades serían arrojados al espacio exterior como objetos de cerámica de un torno de alfarero.

Salviati intenta resolver esta dificultad analizando la relación entre la «tendencia natural» y la «resistencia natural» en términos de la palanca. Si la única resistencia interna al movimiento fuera el peso, no podríamos explicar por qué un cuerpo pequeño puede elevar a otro más pesado en una romana. Esto sólo es posible si reconocemos que el cuerpo más ligero posee, junto con el peso, la cualidad de la velocidad.

> Fija bien en tu imaginación, como un principio verdadero y bien conocido, que la resistencia proveniente de la velocidad del movimiento compensa aquélla que depende del peso del otro cuerpo.[12]

Salviati cree que puede demostrar con este principio que agrandar la circunferencia de un cuerpo giratorio no conduce automáticamente a un aumento de su poder de extrusión.

Si dos ruedas desiguales tienen como centro *A*, *BG* está en la circunferencia de la menor y *CEH* en la de la menor (figura 18); si las fuerzas requeridas para mantener una piedra en el círculo mayor y el menor se miden con la secante *ED* (o la perpendicular trazada de *G* a *BF*), entonces, como *GF* es mayor que *DE*, se requerirá una fuerza mayor para retener la piedra en la rueda menor que en la mayor.

> Es por lo tanto evidente que, cuanto más grande sea la rueda, menor será la causa de la proyección.[13]

La conclusión es verídica, pero la demostración es errónea por dos motivos. En primer lugar, son los ángulos *CAE* y *CAG* los que determinan la aceleración centrípeta, y no las rectas *GF* y *ED*. En segundo lugar, la

11. Galileo, *Diálogo*, *ibid.*, Vol. VII, p. 214.
12. *Ibid.*, p. 242.
13. *Ibid.*, p. 243.

fuerza centrífuga no varía proporcionalmente a la velocidad lineal (como implica el razonamiento de Galileo) sino al cuadrado de esa velocidad. Sin embargo, Galileo no alude a las fuerzas centrífuga y centrípeta sino sólo al peso de la piedra (es decir, su tendencia a caer hacia el centro de la tierra) y parece razonable que haya supuesto que *ED* y *GF* midan la fuerza que opera desde el interior de la piedra.

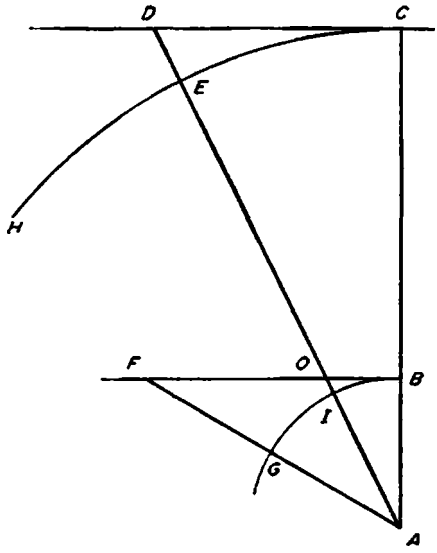


FIGURA 18

El nuevo enfoque

Como Galileo reconoce, esperar que algún fenómeno físico extraordinario confirme el movimiento diurno de la tierra es deformar el resultado en favor de Ptolomeo. Si la tierra se moviera, sus habitantes participarían de su movimiento uniforme, que sería para ellos imperceptible. La estrategia correcta consiste en apelar al cielo, buscar un movimiento común a todos los cuerpos celestes y luego preguntar –a la luz del principio de simplicidad– si ese movimiento no se podría explicar mejor postulando que la tierra misma se mueve.

Esta referencia a la simplicidad como un criterio para ajustar los sistemas cosmológicos indical cuál es la actitud intelectual de Galileo. Revela un compromiso amplio y profundo con una visión estética de la na-

turaleza en que la forma perfecta posee una posición de privilegio. «La forma esférica», declara Salviati,

> es la más fácil y sencilla. Ocupa entre las figuras sólidas el lugar del círculo entre las superficies. Porque la descripción del círculo, como es la más simple de todas, es la única que ha sido considerada por los matemáticos digna de ser incluida entre los postulados referentes a la descripción de todas las otras formas.[14]

El ideal clásico del orden y la sencillez dominaba tanto la imaginación artística de Galileo como su pensamiento científico. Esto es evidente en sus elogios a Ariosto y en sus objeciones a Tasso, y probablemente explica por qué no tomó en consideración las trayectorias elípticas de los planetas de Kepler.

El enfoque estético elude convenientemente los problemas prácticos de la dinámica. Como el movimiento circular es natural (lo que es la categoría explicativa definitiva), Galileo no necesita que una fuerza actúe sobre los planetas para mantenerlos en órbita. En el *Diálogo*, logra mostrarse como un agnóstico acerca del principio del movimiento que opera en o sobre los cuerpos. Cuando Simplicio dice «La causa de este efecto es bien conocida; todo el mundo sabe que es el peso», Salviati responde:

> Te equivocas, Simplicio; lo que deberías decir es que todo el mundo sabe a qué se llama peso. Pero yo no te pregunto el nombre de la cosa, sino su esencia, de la que no sabes nada más de lo que sabes acerca de la esencia de eso que mueve las estrellas, sea lo que sea, excepto el nombre que se le atribuye y que se ha convertido en una palabra familiar y doméstica por la continua experiencia que tenemos diariamente. Pero realmente no comprendemos qué principio o qué fuerza mueve las piedras hacia abajo, así como no comprendemos qué las mueve hacia arriba cuando dejan la mano que las arroja, ni qué mueve a la luna. Como he dicho, sólo tenemos para una cosa el nombre específico y definido de *peso;* a otra le otorgamos el término más general de *fuerza imprimida* («virtù impressa»); a una tercera llamamos *inteligencia*, ya sea *asistente* o *inherente*, y *naturaleza* a la causa de otros infinitos movimientos.[15]

El desacuerdo entre Salviati y Simplicio no se refiere meramente a la naturaleza del peso, sino a la clase de pregunta que es relevante en filosofía natural. Simplicio dice a continuación que, aun si la gravedad fuera imperfectamente comprendida, sería posible determinar si es intrínseca o

---

14. *Ibid.*, p. 235. Erwin Panofsky hablaba del «prejuicio clasicista [de Galileo] en favor de la simplicidad, el orden y la *séparation des genres* y contra la complejidad, el desequilibrio y todas las clase de agregados» («Galileo as a Critic of the Arts», *isis*, n.° 47 [1956], p. 9).

15. *Ibid.*, pp. 260-261.

extrínseca a los cuerpos que caen, puesto que es natural para ellos el movimiento rectilíneo hacia abajo, y Salviati protesta enérgicamente. La dicotomía aristotélica entre el movimiento natural y el violento no sólo es errónea sino que crea un marco de referencia que torna absurda una discusión seria sobre las propiedades del movimiento. Salviati sostiene que el movimiento hacia arriba es tan natural como el movimiento hacia abajo porque son reversibles, como ejemplifica el péndulo al cambiar su movimiento hacia abajo por un movimiento hacia arriba cada vez que alcanza el punto más bajo de su trayectoria. Simplicio no discute la evidencia, pero equipara con el caos conceptual el abandono de la antítesis entre el movimiento natural y el violento:

> Si los cuerpos no tuvieran especiales operaciones y movimientos que nos revelan sus sustancias, no tendríamos forma de comprender y distinguir sus naturalezas.[16]

Los aristotélicos presuponían que el movimiento, aprehendido por los sentidos, revelaba la naturaleza de un cuerpo. Por lo tanto, una teoría física no podía cuestionar los datos inmediatos de la percepción. Galileo partía de una premisa diametralmente opuesta: no es la mera percepción sensorial lo que revela la naturaleza de la realidad física, sino la razón. El movimiento, como tal, no sólo afectaba al cuerpo mismo, sino también a sus relaciones espaciales con otros objetos. Por consiguiente, la barrera metafísica que prohibía la presencia de dos movimientos «naturales» en un cuerpo se convertía en un mero bloqueo mental.

Galileo está decidido a demostrar que la matemática puede disipar la nube de ignorancia peripatética. Cuando Simplicio afirma que, si la tierra girara sobre su eje, los edificios serían arrojados al espacio, Salviati le pide que plantee cuantitativamente el asunto. Simplicio sugiere que, si el movimiento tangencial al globo terrestre fuera un millón de veces más rápido que la aceleración causada por el peso, los cuerpos situados en la superficie de la tierra serían despedidos. «Al decir esto te equivocas –replica Salviati–, no por ignorancia de la lógica, la física o la metafísica, sino de la geometría». Si Simplicio comprendiera «los primeros principios» de esta ciencia, vería que el peso de un cuerpo nunca puede reducirse suficientemente, ni aumentarse suficientemente su proximidad a su punto de partida, como para ser despedido de la superficie de la tierra.[17] Galileo entendía, examinando la línea de contacto, que mientras la tangente a lo largo de la cual sería proyectado el cuerpo se aproximaba más y más al círculo en que éste se movía, la razón entre las longi-

16. *Ibid.*, p. 289.

17. *Ibid.*, p. 224. Para el diagrama simplificado del texto, ver A. Rupert Hall, *From Galileo to Newton 1630-1720* (ed. Collins, Londres, 1964), p. 54.

tudes de la tangente y la secante debía crecer continuamente. Por ejemplo, en la figura 19, por grande que sea la fuerza que actúa a lo largo de la tangente *AB*, no puede mover el cuerpo desde que sólo se necesitará una diminuta fuerza para retenerlo a lo largo de la distancia mucho menor de la secante *BC*. Esta interpretación es ingeniosa pero errónea, porque la fuerza centrífuga aumenta con el cuadrado de la velocidad, y si la tierra se moviera con suficiente rapidez, los cuerpos se proyectarían al espacio. El análisis de Galileo lleva a una paradoja que aparentemente no vio: si su teoría hubiera sido correcta, habría impedido que una piedra partiera de una honda si una mínima fuerza la retenía.

Quizá Galileo haya sido conducido al error por un modelo que Sagredo menciona:

> De este modo se podría estimar que la rotación de la tierra sería tan capaz de despedir una piedra como cualquier rueda pequeña que sólo diese una vuelta en veinticuatro horas.[18]

Como no conoce la verdadera causa de la aceleración ni el hecho de que la fuerza centrífuga aumenta con el radio cuando la velocidad *angular* es constante, Galileo no advierte que el modelo de la rueda pequeña es inadecuado. Además, domina su mente la convicción de que los cuerpos tienden a girar alrededor del centro de la tierra una vez cada veinticuatro horas. Esto explica por qué no compara fuerzas sino longitudes lineales, como si el enfoque cinemático fuera totalmente adecuado. Sólo se puede resolver la dinámica de esta situación calculando la fuerza centrífuga originada por la rotación terrestre y comparándola con la fuerza de gravedad. Pero esta explicación exigía los descubrimientos que Huygens y Newton sólo habían de realizar medio siglo más tarde. Debe observarse, sin embargo, que la piedra en la honda no es para Galileo un medio de experimentación, sino un símil apropiado. Como explica Salviati,

> es meramente un ejemplo aproximado para incitar a nuestras mentes a considerar con mayor exactitud si la causa de la proyección aumenta en la misma razón que la velocidad.[19]

El resultado de la prueba de Galileo no es tan importante como su defensa de la capacidad explicativa de las matemáticas. Dice Salviati:

> Ya ves, Simplicio, si es posible filosofar bien acerca de la naturaleza sin la geometría...

Y Sagredo remarca:

---

18. *Ibid.*, p. 244.
19. *Ibid.*, p. 239.

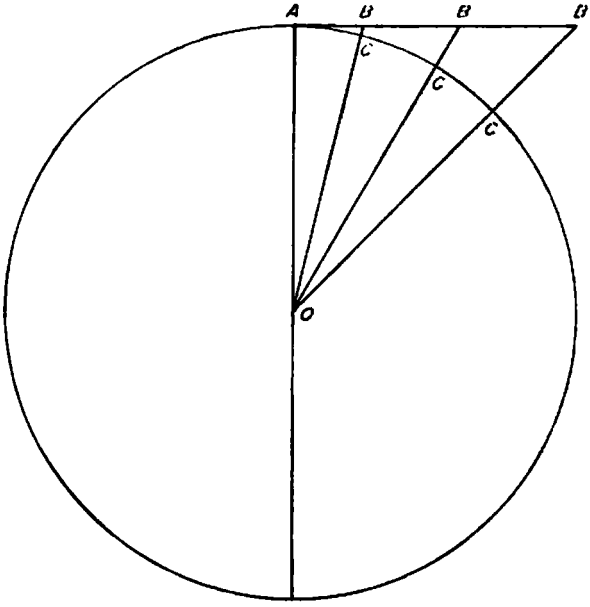


FIGURA 19

> El argumento es tan convincente como sutil; y se debe confesar que tratar de resolver problemas naturales sin geometría es intentar lo imposible.[20]

Nuevamente se produce un conflicto metodológico en la Segunda Jornada, esta vez acerca de las propiedades de los cuerpos que caen. Los aristotélicos se contentaban con hablar de la aceleración en términos puramente cualitativos. Un cuerpo cae cada vez más rápido, dice Simplicio, «porque tal es la naturaleza de los cuerpos pesados, que *vires acquirunt eundo*».[21] Salviati se burla de este vago conocimiento que estima inútil y solicita la determinación de la razón en que se produce este aumento de velocidad. Para Simplicio la pregunta carece de interés filosófico:

> En lo que concierne al filósofo natural, no creo necesario que descienda a particularidades diminutas. Basta con el conocimiento general de la defi-

20. *Ibid.*, pp. 227 y 229.
21. *Ibid.*, p. 172.

> nición de movimiento y de la distinción entre movimientos naturales y violentos, uniformes y acelerados, y otros similares.[22]

En otro contexto, había recordado a Salviati que:

> los filósofos se ocupan principalmente de los universales; encuentran las definiciones y las propiedades más comunes, dejando ciertos detalles y sutilezas –que más bien son curiosidades– a los matemáticos...

El mismo Aristóteles,

> dejaba a los mecánicos y a otros artesanos la investigación de las razones y otras propiedades más particulares de la aceleración.[23]

Salviati ve en el desdén por las matemáticas la causa del error conceptual que llevó a Aristóteles a afirmar que la velocidad de los cuerpos que caen es proporcional a su peso, idea que implica consecuencias ridículas. Por ejemplo, si una bola de cien libras y otra de una libra, del mismo material, fueran arrojadas en el mismo momento desde una altura de cien brazos, la más pesada debería llegar al suelo antes de que la más ligera hubiese descendido un brazo. El método correcto es usar un modelo como el péndulo para determinar las relaciones matemáticas que gobiernan la caída libre. En un péndulo que oscila, a la velocidad creciente de la masa descendente le sigue una velocidad decreciente mientras se eleva. Como el aumento y la disminución tienen la misma razón, un cuerpo que se moviera uniformemente a la velocidad adquirida en su punto máximo, recorrería dos veces la distancia atravesada al caer, con una aceleración constante, desde un estado inicial de reposo, en la misma cantidad de tiempo.

Antonio Rocco, en sus *Esercitazioni Filosofiche*, reaccionó vigorosamente contra la crítica de Galileo a la teoría de la caída libre de Aristóteles. Alegaba que el tiempo de caída era demasiado breve para permitir la percepción sensorial, y comparaba el fenómeno con el movimiento de las manecillas del reloj, que se puede inferir pero no percibir. En su respuesta, Galileo menciona dos experimentos que desaprueban las anticipaciones del empirismo primario. Se puede demostrar que una bola de cien libras de peso cae desde una altura de cien brazos mientras un hombre camina cinco o seis pasos. Por lo tanto, si Aristóteles tuviera razón, uno esperaría que una bola de una libra, arrojada desde igual altura, sólo llegara al suelo cuando ese hombre ha dado quinientos o seiscientos pasos. Desde luego, el resultado desmiente por completo la teoría. Por otra parte, el oído permite una precisa discriminación entre los

22. *Ibid.*, p. 249.
23. *Ibid.*, pp. 189-190.

tiempos en que caen los cuerpos. Si se dejan caer a la vez dos piedrecillas, una desde un brazo de altura y la otra desde un brazo y medio, se puede oír el ruido de la primera, cuando da contra el suelo, claramente antes de que caiga la segunda.[24]

Esta confrontación llega a su punto culminante cuando Salviati urge la dilucidación de la naturaleza de las matemáticas y se burla de Simplicio, «aunque no creo que él sea de esos peripatéticos que desalientan, en sus alumnos, el estudio de las matemáticas como algo que corrompe la inteligencia y la torna menos apta para la concentración». La respuesta de Simplicio convierte la discusión en un enérgico debate entre la concepción platónica del conocimiento y la aristotélica:

> No seré injusto con Platón, pero diré con Aristóteles que aquél se sumergió demasiado profundamente en la geometría y quedó demasiado fascinado por ella, porque finalmente, Salviati, las sutilezas matemáticas pueden funcionar bien en lo abstracto, pero no cuando se aplican a cosas físicas y sensibles. Por ejemplo, los matemáticos pueden probar muy bien en la teoría que *sphaera tangit planum in punto*, una proposición similar a la que ahora encontramos; pero cuando se trata de la aplicación práctica, las cosas van por otro camino.

La respuesta de Salviati es la reivindicación del realismo matemático:

> No me gustaría dejarte en este nuevo error de pensar que una esfera material no toca el plano en un solo punto; espero que una conversación de apenas unas pocas horas con personas que tengan algún conocimiento de la geometría te mostrará algo más inteligente entre quienes nada saben.[25]

Simplicio denuncia el «ajuste flojo», en términos ontológicos, entre las formas abstractas y las realizaciones materiales concretas:

> Yo creo que la proposición de los filósofos debe tomarse en ese sentido; porque no hay duda de que es la imperfección de la materia lo que impide la correspondencia entre las cosas tomadas concretamente con las consideradas en abstracto.

Salviati no está de acuerdo. Insiste en que una esfera material bien hecha tendrá las mismas propiedades que una esfera ideal y sólo tocará la superficie de un plano en un punto. Toda discrepancia se deberá a error de cálculo.

> ¿Sabes qué ocurre, Simplicio? Así como el contable que quiere aplicar sus

24. Apostilla de Galileo a las *Esercitazioni Filosofiche* de Antonio Rocco (1633), *ibid.*, p. 728.

25. Galileo, *Diálogo*, *ibid.*, pp. 229-230.

> cálculos al azúcar, la seda y la lana debe descontar las cajas, envoltorios, y demás embalajes, el científico matemático [*filosofo geometra*] cuando desea reconocer en concreto los efectos que ha demostrado en abstracto, debe restar los obstáculos materiales; y si sabe cómo hacerlo, te aseguro que las cosas darán resultados tan ajustados como cálculos aritméticos. Entonces, los errores no están en la abstracción o en la concreción, ni en la geometría o en la física, sino en el hombre que cuenta y no sabe hacer bien las cuentas.[26]

Antonio Rocco intentó defender la posición tradicional aristotélica acusando de contradicción a Galileo. Si era verdad que una esfera tocaba un plano en un punto, la recta debería estar hecha de puntos. Y esto sería absurdo porque los puntos son indivisibles en tanto que se pueden dividir las rectas. Galileo dio cierta importancia al asunto y escribió en su ejemplar del libro de Rocco una larga apostilla, que luego amplió y convirtió en un artículo para su ulterior publicación. La solución de Galileo consistía en tragarse la paradoja aparente. Afirmaba que la recta es divisible aunque esté compuesta de puntos indivisibles. Si la división podía proseguir indefinidamente, la cantidd de partes debía ser infinita. Pero si la cantidad de partes era infinita, no se podía extender, desde que una cantidad infinita de partes extendidas determinaría un cuerpo infinitamente extendido, en tanto que las extensiones consideradas eran finitas. Por lo tanto, las partes finales de un continuum eran necesariamente indivisibles. O para ponerlo en términos levemente diferentes, si el continuum se componía de partes divisibles, no se podía extender la división a los primeros componentes. Por lo tanto, los primeros componentes no debían ser divisibles: eran los puntos.

Galileo no ignoraba que los aristotélicos, que estudiaban el problema en términos de acto y potencia, afirmaban que el número de partes divisibles del continuum era realmente finito pero potencialmente infinito. Él consideraba que esta distinción no tenía sentido, pero no tenía inconveniente en usarla para derrotar a sus adversarios en su propio terreno. Si ellos podían considerar «real» una cantidad finita de partes, él podía hacer «real» un número infinito de puntos simplemente plegando repetidas veces una recta, primero para darle la forma de un polígono de gran cantidad de lados y luego la de un círculo, un polígono de infinitos lados. Si ese círculo giraba sobre una superficie plana, trazaría una recta formada por el número infinito de sus puntos. Galileo no proseguía este

---

26. *Ibid.*, pp. 233-234. Como observa Alexandre Koyré: Galileo «part de l'idée –préconçue sans doute, mais qui forme le fond de sa philosophie de la nature– que les lois de la nature sont des lois mathématiques. *Le réel incarne le mathématique.* Aussi n'y a-t-il pas, chez Galilée, d'écart entre l'expérience et la théorie; la théorie, la formule, ne s'applique pas aux phénomènes du dehors, elle ne 'sauve' pas ces phénomènes, elle en exprime l'essence» (Alexandre Koyré, *Études Galiléennes*, 1939, reed. Herman, Paris, 1966, p. 156).

razonamiento sino que terminaba con una promesa de novedades matemáticas y con una burla a las herramientas conceptuales de los peripatéticos:

> Oirás otras admirables consecuencias en alguna otra ocasión, en que espero demostrar que la forma en que se suele comprender el progreso de la naturaleza, y que destierra por superfluos, vanos y perniciosos los conceptos de infinidad, indivisibilidad y vacío, conduce tan bien a los filósofos a la meta prevista como un pintor o un carpintero que enseñara a su aprendiz a arrojar a un lado la pintura, los pinceles, o el martillo, la lima y la bigornia como instrumentos y materiales inútiles e incluso perjudiciales para su oficio.[27]

Lo que ofendía particularmente a los aristotélicos en este pasaje era que se atribuyera importancia capital a conceptos que no tenían contraparte empírica. Durante toda la Segunda Jornada, la actitud de Simplicio es la de un empirista indignado, atacado por vez primera en la tierra firme del sentido común. Simplicio está convencido de que los sentidos de la vista y el tacto serían invalidados si la tierra se moviera, porque se *ve* caer los cuerpos en línea recta, y se *siente* que la tierra está en reposo. Cuando Salviati le pregunta cómo se debe estudiar la trayectoria de los cuerpos que caen, responde: «Mediante los sentidos que nos aseguran que la torre es recta y perpendicular, y que la piedra, al caer, la roza.» Más adelante, exclama: «Pero, por el cielo, si se mueve oblicuamente, ¿por qué la veo caer en línea recta? Esto es una negativa total de los sentidos, y si no podemos creer en los sentidos, ¿por qué otra puerta entraremos en la filosofía?»[28]

Para hacer frente a estas objeciones, Salviati apela al «experimento» para corregir los errores de la «experiencia»: un hombre que está en un bote y mira otro bote no puede afirmar, sin mirar la costa, si es el suyo el que se mueve o el otro el que boga en la dirección opuesta. Tan sólo tenemos un prejuicio en favor de la estabilidad de nuestro marco de referencia inmediato. Sagredo cierra la discusión con un ejemplo gracioso. Cuando caminamos por la calle las noches de luna, podemos ver que la

---

27. Apostilla a las *Esercitazioni Filosofiche* de Antonio Rocco, *Opere de Galileo*, Vol. VII, p. 748. Posteriormente, en los *Discorsi*, Galileo retornó al problema de las partes de un continuum, sosteniendo que el razonamiento matemático objetivo exige que la materia esté constituída por una cantidad infinita de átomos indivisibles (ver William R. Shea, «Galileo's Atomic Hypothesis», *Ambix*, n.º 17, 1970, pp. 24-27).

28. Galileo, *Dialogo*, *ibid.*, pp. 165 y 197. Aclaran el punto de lo que Galileo considera empirismo burdo varias citas de *De tribus novis stellis*, 1628, de Scipione Chiaramonti, donde acusa al copernicanismo de subvertir el criterio de la evidencia sensorial: «*Ex hac itaque opinione necesse est diffidere nostris sensibus, ut penitus fallacibus vel stupidis in sensibilibus, etiam conjunctissimis diudicandis*» (*ibid.*, p. 280); «in dottrina del Copernico bisogna negare i sensi, e le sensazioni massime» (*ibid.*, p. 278); «in via del Copernico bisogna negar le sensazioni proprie» (*ibid.*, p. 279).

luna se desliza sobre los techos y nos sigue, «una apariencia que evidentemente nos engañaría, si no interviniera la razón».[29]

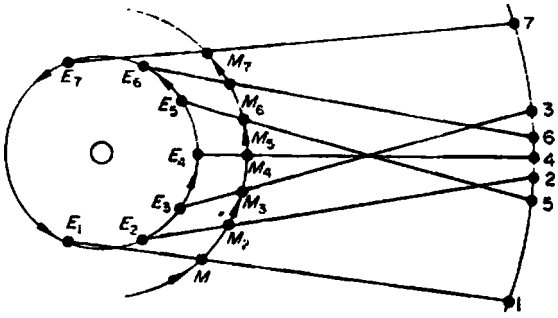
EL MOVIMIENTO ANUAL DE LA TIERRA

La Tercera Jornada trata del tema principal: el movimiento anual de la tierra. Comienza con la vigorosa denuncia de los burdos errores de Chiaramonti. Este filósofo peripatético había intentado demostrar que los recientes datos astronómicos no permitían situar las *novas* más allá de la luna. Galileo invierte considerable tiempo y energía en probar que Chiaramonti estaba desesperadamente confundido. Trató de demostrar definitivamente que todas las nuevas estrellas estaban en el cielo, y también de dar la impresión de que podía realizar con gran facilidad cálculos astronómicos, preparando así al lector para argumentos más sorprendentes. Pero su objetivo principal era persuadir a sus contemporáneos de que el telescopio había eliminado incontrovertiblemente las objeciones más importantes contra el copernicanismo. Todos podían ver que Venus tenía fases, como la luna, que los diámetros aparentes de Marte y Venus variaban tanto como cuarenta y sesenta veces, y que un planeta, Júpiter, no estaba acompañado en su órbita por una sola luna, sino por cuatro. Además, como el telescopio no magnificaba las estrellas distantes sino que las reducía a puntos diminutos, se demostraba infundado el temor de que las estrellas tuvieran dimensiones gigantescas, formulado por Tycho Brahe.

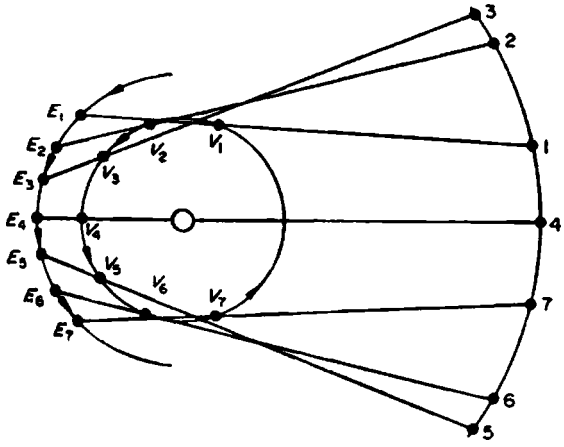
Eliminadas estas dificultades, Salviati sostiene que ya no hay ningún obstáculo para admitir la mayor simplicidad y naturalidad de la hipótesis copernicana. Entre otras ventajas, ésta explicaba las irregularidades aparentes del movimiento de los planetas sin llenar el cielo de epiciclos y deferentes como el sistema ptolemaico. En la figura 20 (*a*), las líneas de mira desde la tierra, *E*, muestran por qué un planeta más alejado del sol que la tierra como Marte, *M*, parece invertir su dirección sobre el fondo de las estrellas distantes. Este movimiento retrógrado sólo es aparente y se debe a que Marte gira alrededor del sol más lentamente que la tierra. Se explica con el mismo principio en la figura 20 (*b*) el movimiento de Venus, cuya órbita se encuentra entre la tierra y el sol. Este planeta se mueve más rápido que la tierra. En el modelo ptolemaico sus detenciones y retrocesos sólo se podían explicar mediante una intrincada serie de ruedas entrelazadas. Repugna a la bien templada mente de Sagredo una maquinaria celestial tan complicada:

> Si este universo estuviera ordenado de acuerdo con esa multiplicidad, habría que eliminar de la filosofía muchos axiomas comúnmente adoptados

29. *Ibid.*, p. 281.



(a)



(b)

FIGURA 20

por todos los filósofos: la naturaleza no multiplica innecesariamente las cosas; usa para producir sus efectos los medios más fáciles y sencillos; no hace nada en vano, y otros axiomas similares.[30]

Pero todavía quedaba en el paso un grave obstáculo: el «tercer movimiento» que Copérnico se había sentido obligado a atribuir a la tierra

30. *Ibid.*, p. 423.

para mantener su eje inclinado, apuntando a la estrella polar. Haber logrado demostrar que ese movimiento era innecesario fue uno de los grandes éxitos de Galileo. Salviati señala que el transporte del eje terrestre, paralelamente a sí mismo, no es en realidad otro movimiento sino una especie de reposo. Ejemplifica esto con la conducta de una bola en un recipiente de agua sostenido por una persona que describe un giro completo: la bola gira con respecto al recipiente, pero se mantiene en reposo con respecto a los objetos fijos de la habitación. No tiene en cuenta, sin embargo, la precesión de los equinoccios, que también se proponía explicar el tercer movimiento de Copérnico.

La proscripción de la teoría heliocéntrica por el Decreto de 1616 obligó a Galileo a presentar el tema de modo aproximativo; pero hubiera considerado como una renunciación y un fracaso definitivos la reducción de su finalidad a la «salvación» de los fenómenos. Salviati no tiene inconveniente en «dejar a otros la determinación de cuál es la posición verdadera», pero está convencido de que:

> el resultado no será ambiguo durante mucho tiempo, porque un sistema debe ser verdadero y el otro falso. No es posible (hablando dentro de los límites del conocimiento humano) que las razones aducidas para la hipótesis verdadera no se manifiesten tan concluyentes, como vanas e ineficaces las opuestas.[31]

Cuando Galileo se convenció de que habían quedado refutadas las principales objeciones contra el movimiento de la tierra, se convirtió en un apologista determinado a demostrar que todas las pruebas, correctamente interpretadas, apoyaban su posición. Dijo claramente: «Las enfermedades están en Ptolomeo y la cura en Copérnico».[32] Llamó en su ayuda a las manchas solares, viendo en la curvatura de su trayectoria sobre la superficie solar, «la confirmación más sólida y convincente del copernicanismo».[33] La interpretación de Galileo es algo complicada –para no decir «oscura», como él admite– pero la intención principal es la búsqueda de la simplicidad. En el sistema heliocéntrico, la inclinación variable de las manchas solares en el período de un año puede explicarse suficientemente por una sola rotación solar sobre un eje fijo; en el sistema geocéntrico, se requería un complejo de movimientos sobre dos ejes. Ninguna razón lógica se oponía a la unión de dos movimientos giratorios, pero Galileo encontraba una ventaja matemática en tratarlos por separado. El argumento no era decisivo, pero Galileo pensaba que

31. *Ibid.*, p. 383.
32. *Ibid.*, p. 369.
33. *Ibid.*, p. 374. Ver Stillman Drake, *Galileo Studies* (ed. The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1970), pp. 191-196.

se debía preferir la teoría heliocéntrica porque ofrecía una explicacion más simple, y por lo tanto más natural.

Cuando Simplicio afirma que el sistema ptolemaico explicaba igualmente bien todos los fenómenos celestes, Salviati replicaba que Ptolomeo calculaba de manera descollante el curso de los planetas uno por uno, pero que su sistema es incoherente. Sus cálculos satisfacen al «astrónomo puro», pero no otorgan la paz mental al «astrónomo filósofo».[34] Galileo sabe que el manejo puramente formal de los datos provenientes de la observación capacita a los astrónomos para hacer predicciones válidas, pero cree que esto siempre involucra contradicciones. En ningún momento admite la idea de un divorcio entre la teoría matemática y la realidad física, y expresa vigorosamente este punto de vista en su *Consideración de la hipótesis copernicana* de 1616:

> Si la estabilidad de la tierra y el movimiento del sol tienen naturaleza real, y lo contrario es absurdo, ¿cómo podrá decir alguien razonablemente que la posición errónea concuerda mejor que la verdadera con las apariencias visibles y manifiestas de los movimientos y disposiciones de las estrellas? ¿Quién no sabe que todas las verdades de la naturaleza se ajustan a la armonía más exquisita?[35]

Esta fe en una estricta correspondencia entre el razonamiento matemático simple y las obras de la naturaleza está firmemente unida a una concepción que permite discrepancias entre los cálculos astronómicos y las observaciones reales. Cuando Francesco Ingoli destacó que, como había establecido Tycho Brahe, algunos cálculos de Copérnico conducían a predicciones erróneas, Galileo se limitó a encogerse de hombros. Ingoli, declaró, le recordaba un hombre que echara abajo su casa porque salía humo de la chimenea. Los astrónomos jamás lograrían un progreso si abandonaban sus esquemas cada vez que encontraban un fenómeno aparentemente opuesto a él.

> Te aseguro que los movimientos, tamaños, distancias y disposiciones de las órbitas y las estrellas nunca serán observados con tanta exactitud que no necesiten infinitas correcciones, aunque el mundo se llene de hombres como Tycho Brahe o cien veces mejores. Podemos estar seguros de que hay muchos movimientos, alteraciones, anomalías y otras cosas en el cielo todavía ignoradas o no observadas y quizá ni siquiera observables ni explicables en sí. ¿Quién puede jurar que el movimiento de los planetas no es inconmesurable y por lo tanto susceptible de eternas enmiendas, ya que sólo podemos estudiarlo como si fuera conmesurable?[36]

34. *Ibid.*, p. 369.
35. Galileo, *Consideraciones sobre la hipótesis copernicana* (1616), *ibid.*, Vol. V, p. 356.
36. Carta a Ingoli (1624), *ibid.*, Vol. VI, p. 533.

Esta justificación tan retórica de Copérnico involucra la justificación de Ptolomeo y, en verdad, de cualquier sistema astronómico que permita predicciones útiles. En el *Diálogo*, Galileo se cuida de no repetir este error y, en la Segunda Jornada, después de reafirmar el valor de las matemáticas, evita mencionar la posibilidad de cuerpos inconmesurables. Reconoce las discrepancias entre la teoría y la práctica, pero las atribuye enteramente a una estimación errónea, y las compara con los efectos del embalaje sobre el peso total de un objeto.

En el *Diálogo*, Galileo no explica sobre qué fundamentos sostiene que Copérnico no era un instrumentalista, como Osiander sugería en el célebre prefacio a *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Galileo había tratado ya este problema en 1616:

> Hasta ahora los astrónomos han formulado dos clases de postulados: los primeros se refieren a la verdad absoluta de la naturaleza; los otros han sido imaginados para explicar los movimientos aparentes de los cuerpos celestes que, en cierto sentido, están en desacuerdo con los primeros y verdaderos postulados.[37]

Galileo estaba persuadido de que Copérnico consideraba que el movimiento de la tierra era una verdad absoluta de la naturaleza, y no un mero método para facilitar los cálculos, puesto que retornaba al modelo ptolemaico cada vez que esto facilitaba los cálculos. Los principales postulados opuestos de Ptolomeo se podían enumerar, a juicio de Galileo, en la forma siguiente: (a) el movimiento celeste es uniforme y circular; (b) la tierra y el firmamento son esferas; y (c) la tierra está en reposo en el centro del universo. Sin embargo, Galileo deseaba destacar que Ptolomeo creía verdaderamente en la realidad física de los deferentes y los epiciclos y que los había empleado para explicar el movimiento aparente de los planetas. Entedía Galileo que ésta era una consecuencia necesaria de sus primeros postulados: si la tierra era estacionaria y los movimientos de los cuerpos celestes necesariamente circulares, entonces sólo se podían explicar las detenciones y los retrocesos mediante la acción de verdaderos epiciclos y deferentes. Solamente con el sistema heliocéntrico, agregaba, se podía mantener el principio del movimiento circular uniforme sin cubrir el cielo con una intrincada serie de ruedas y engranajes. Las pruebas físicas ideales deberían aproximarse a las demostraciones geométricas en rigor y simplicidad. Por este motivo, Salviati elogia los trabajos experimentales de Gilbert acerca de la piedra imán aunque hubiera deseado

> que fuese mejor matemático y en especial bien formado en geometría,

37. Galileo, *Consideraciones sobre la hipótesis copernicana*, *ibid.*, Vol. V, p. 357.

> cuya práctica le habría tornado menos dispuesto a aceptar como pruebas rigurosas las razones que aduce como causas reales de las conclusiones que él mismo ha observado. Estas razones, hablando claramente, no tienen el rigor indudablemente requerido para obtener conclusiones naturales, necesarias y eternas.[38]

Por carencia de formación matemática, personas inteligentes formulaban objeciones ridículas al movimiento de la tierra y preguntaban, por ejemplo, por qué no se sentían transportadas a Persia o a Japón. Las matemáticas podían agudizar sus mentes y permitirles ir más allá del velo de los sentidos. Cuando Salviati enumera las pruebas astronómicas en favor de la teoría heliocéntrica, Sagredo se asombra de que no la acepte aún todo el mundo. En cambio, Salviati se maravilla de que alguien haya podido sostenerla antes de la invención del telescopio. Semejante proeza intelectual es la marca del genio:

> No puedo admirar suficientemente la eminencia intelectual de aquellos que la escucharon y la juzgaron verdadera. Por la vividez de su intelecto han violentado sus propios sentidos, prefiriendo lo que les decía la razón a lo que la experiencia de los sentidos les mostraba con evidencia... repito, mi admiración no tiene límites cuando considero que la razón fue capaz, en Aristarco y en Copérnico, de vencer violentamente a sus sentidos y enseñorearse de su credulidad.[39]

Eran incapaces de ver las fases de Venus y las variaciones de los diámetros aparentes de Marte y de Venus. Y sin embargo,

> confiaban en lo que les decía la razón y afirmaban que la estructura del universo no podía tener otra forma que la diseñada por ellos.[40]

«Oh, Niccolò Copérnico, ¡qué placer te habría dado el telescopio!», dice Sagredo. «Sí», comenta Salviati,

> pero, ¡cuánto menor es la fama de su intelecto sublime entre los entendidos! Porque vemos, como ya he mencionado, que él continuaba afirmando persistentemente, con la ayuda de argumentos racionales, lo que la experiencia de los sentidos le mostraba como lo opuesto.[41]

Para Galileo, la revolución científica, el paso de la vieja visión del mundo a la nueva, no es primariamente el resultado de más y mejores observaciones; es la inspirada reducción matemática de un complejo laberin-

---

38. Galileo, *Diálogo*, Vol. VII, p. 432.
39. *Ibid.*, p. 355.
40. *Ibid.*, pp. 362-363.
41. *Ibid.*, p. 367.

to geométrico a un sistema hermosamente simple y armonioso. Es, en verdad, una nueva visión digna del mismo Platón.

El platonismo de Galileo

En el siglo XVII, el platonismo era un movimiento y no una escuela, en el sentido de que aquéllos a quienes se daba el nombre de platónicos representaban una amplia gama de finalidades e intereses.[42] Su nexo común era el rechazo de algunas o todas las doctrinas de Aristóteles, pero con frecuencia no concordaban acerca de las alternativas o del método correcto para elegir entre ellas. Los matemáticos que trataban de establecer la constitución del universo preguntándose cuál era la geometría más sencilla y armoniosa que se podía imaginar para adaptarse a los hechos, eran considerados platónicos. A los ojos de sus contemporáneos, y a los suyos propios, no había dudas acerca de la posición de Galileo. Cuando Salviati defiende la teoría heliocéntrica por su economía y elegancia matemática encuentra una réplica que menciona su enfoque platónico:

> Si debo decirte francamente qué pienso, me parece que éstas son como las sutilezas geométricas que Aristóteles reprochaba a Platón cuando le acusaba de alejarse del sólido filosofar por estudiar demasiada geometría. He conocido algunos grandes filósofos peripatéticos, y les he oído desaconsejar a sus alumnos el estudio de las matemáticas como algo que torna el intelecto bizantino e incapaz de filosofar como es debido. Es una doctrina diametralmente opuesta a la de Platón, que no admitía a nadie a estudiar filosofía si antes no dominaba la geometría.[43]

Platón creía que el mundo eternamente cambiante de nuestra experiencia debía explicarse mediante las formas ideales; y consideraba que el movimiento circular uniforme era una de las formas intelectualmente satisfactorias y capaz de explicarse por sí misma. Galileo no adhería tan estrechamente a esta concepción de estructuras ideales o, por lo menos,

---

42. No existe, por lo que sé, un estudio amplio del platonismo en la segunda mitad del siglo XVI y las primeras décadas del XVII. Para Koyré la línea de demarcación entre el platonismo y el aristotelismo es nítida: «la ligne de partage entre aristotéliciens et platoniciens est très nette: si l'on proclame la *valeur supérieure* des mathématiques, si, au surplus, on leur attribue une valeur réelle et une position dominante dans et pour la physique, on est platonicien; si, au contraire, on voit dans les mathématiques une science 'abstraite', et par conséquent de *valeur moindre* que les sciences –physique et métaphysique– qui s'occupent du réel, si, en particulier, on prétend fonder la physique *directement sur l'expérience*, en n'attribuant aux mathématiques qu'un rôle d'adjuvant, on est aristotélicien» (A. Koyré, *Etudes Galiléennes*, p. 279).

43. Galileo, *Dialogo*, *Opere di Galileo*, Vol. VII, p. 423.

nunca expuso sistemáticamente sus puntos de vista sobre el tema. Sin embargo, estaba indudablemente convencido de que un universo racional de precisión matemática sostenía el mundo empíricamente dado del «más o menos». Demostró permanente predilección por las formas perfectas del círculo y la esfera, y jamás dudó de que era preciso interrogar a la naturaleza en el lenguaje de las matemáticas.

Hay todavía otro sentido en que la idea galileana del conocimiento científico se aproximaba a la de Platón.

Platón sostenía que el alma, antes de entrar en el cuerpo, conoce directamente las Formas que modelan el mundo. Cuando entra en el cuerpo, este sereno conocimiento es arrastrado por la inundación de las nuevas sensaciones. Aunque todo se olvida, no se destruye. Una experiencia posterior de cosas modeladas según cierta Forma puede hacer que una persona recuerde su conocimiento previo de la Forma misma. Según este punto de vista, es indispensable la experiencia para llegar a un conocimiento que trasciende la experiencia. Galileo no dice que el alma existe antes del cuerpo. Pero dice que la mente humana está afinada de antemano con la naturaleza:

> La naturaleza hizo inicialmente las cosas a su modo, y luego hizo bastante hábil la razón humana para que pudiera comprender alguna parte de su secreto, pero sólo con gran fatiga.[44]

Esa «gran fatiga» se refiere a la difícil tarea de crear hipótesis, derivar matemáticamente conclusiones que se pueden poner a prueba, imaginar experimentos bien elegidos para probarlas, y observar de cerca el resultado de los experimentos. «Coincide totalmente con la epistemología de Platón –escribe J. W. N. Watkins– que parezca finalmente verdad una idea que al principio no parecía evidente en sí o que incluso se oponía totalmente a la intuición. El conocimiento dormido que de ella se tiene puede tardar en despertar».[45] En el caso de Copérnico, Galileo afirma explícitamente que, con el descubrimiento del telescopio, se disipaba el carácter opuesto a la intuición que podía generar inicialmente confusión. Con nuevos experimentos se eliminaría el aire de improbabilidad que rodeaba al comienzo las proposiciones obtenidas mediante el razonamiento matemático. Esa «gran fatiga» serviría para disipar la «densa y profunda nebulosidad» que vela nuestra inteligencia y para permitir que logremos «conocer las artes maravillosas que se ocultan detrás de cosas aparentemente triviales».

«La teoría de Platón implica que el maestro no puede conducir al alumno al conocimiento de una verdad general tratando de instilarla en

44. *Ibid.*, p. 289.
45. J. W. N. Watkins, *Hobbes's System of Ideas* (ed. Hutchinson, Londres, 1965), p. 61.

él. Su papel debe ser el de una partera intelectual que ayuda al alumno a llevar a la conciencia sus conocimientos latentes. Su papel consiste en extraer cosas (como se supone que hacía Sócrates) y no en introducirlas.[46] Galileo habría suscrito este punto de vista. Salviati, como Sócrates en el *Menón*, practicaba la obstetricia mental. Vale la pena contribuir al nacimiento de algunas ideas nuevas.

En la Primera Jornada, Salviati señala los defectos de la prueba aristotélica de la tridimensionalidad de los cuerpos, y dirige la atención de Simplicio hacia otra mejor «que ya conoces, aunque quizá sin que lo sepas».[47] Esa misma jornada, más tarde, Salviati afirma que la velocidad de un cuerpo que cae por la perpendicular de un triángulo es igual a la de un cuerpo que cae por el lado inclinado y que sin embargo, en cierto sentido, es mayor.

> Sagr.: A mis oídos suenan como proposiciones contradictorias.
> ¿Qué te parece, Simplicio?
> Simp.: Pienso lo mismo.
> Salv.: Creo que os burláis de mi fingiendo ignorar *lo que comprendéis mejor que yo.*

Y volviéndose a Sagredo:

> ¿Y tú qué piensas, Sagredo? No quiero enseñarte lo que ya sabes.[48]

Cuando Simplicio dice que la tierra no podría reflejar la luz porque es opaca y oscura, Salviati lo lleva a reconocer su error y luego agrega:

> Si estás convencido ahora, Simplicio, puedes ver cómo tú mismo sabías realmente que la tierra no brilla menos que la luna, y que no ha sido mi instrucción sino *meramente el recuerdo* de algunas cosas que ya conocías lo que te ha persuadido. Porque yo no te he enseñado que la luna brilla más de noche que de día; ya lo sabías, y también que una nubecilla puede ser tan clara como la luna. Del mismo modo, sabías que la luz de la tierra no se ve de noche y, en suma, lo sabías todo sin saber que lo sabías.
>
> .....
>
> Simp.: Realmente, yo pensaba que la luz secundaria de la luna era propia de ella misma.
> Salv.: Nuevamente conoces la respuesta sin darte cuenta de que la sabías.[49]

46. *Ibid.*, p. 62.
47. Galileo, *Dialogo, Opere di Galileo*, Vol. VII, p. 36.
48. *Ibid.*, p. 48, cursivas del autor.
49. *Ibid.*, p. 115, cursivas del autor.

Salviati sabe qué ocurrirá si se arroja una piedra desde lo alto del mástil de un barco en movimiento antes de que se desarrolle el experimento. Y también Simplicio:

> Sin experimentar, estoy seguro de que ese efecto ocurrirá, como te digo, porque es necesario que ocurra. Déjame agregar, además, que tú mismo sabes ahora que no puede ser de otro modo, aún cuando pretendas o simules pretender que no lo sabes. Pero soy tan hábil para excitar la mente de las personas que te lo haré confesar a viva fuerza... Si tan sólo Simplicio desea responder a mis preguntas, no fallaré.[50]

Simplicio se somete al interrogatorio y descubre por sí mismo que la piedra caerá al pie del mástil tanto si el barco se mueve como si está en reposo. Esto nos recuerda el *Menón* platónico, en que Sócrates logra que un joven esclavo iletrado reemplace su idea errónea acerca de cómo construir un cuadrado de doble superficie a la de un cuadrado dado con la idea correcta, simplemente haciéndole preguntas, extrayendo lo que el joven esclavo, sin saberlo, ya sabía.

Sagredo expone el fundamente epistemológico de esta técnica:

> Si uno no sabe la verdad por sí mismo, es imposible que otro se la enseñe. Puedo enseñaros cosas que no son verdad ni mentira; pero las verdaderas –es decir, las necesarias, las que no pueden ser de otra manera– la razón corriente las sabe por sí mismas o no las sabrá nunca.[51]

Este pasaje expresa claramente una idea de dos caras: los principios primarios de la ciencia son necesarios y no contingentes; el conocimiento de esos principios es innato y no adquirido, de modo que se puede despertar pero no instilar. Salviati ayudará a Simplicio a descubrir si la tierra se mueve, «siguiendo nuestro método habitual y mostrándole que tiene la solución en la punta de la lengua y no se da cuenta».[52]

Si se hace girar un cubo de agua con un agujero en el costado, se observa que el agua brota en ángulo recto, lo que parece confirmar la idea de Aristóteles acerca de la proyección de los objetos de una esfera giratoria; pero como dice Salviati dirigiéndose a Simplicio,

> La solución depende de la información que tú conoces y tanto tú como yo creemos; pero como no la recuerdas, no la encuentras. Por lo tanto, sin enseñártela, puesto que ya la conoces, sino haciendo simplemente que la recuerdes, lograré que respondas tú mismo a tu objeción.

---

50. *Ibid.*, p. 171.
51. *Ibid.*, p. 183.
52. *Ibid.*, p. 194.

Esto provoca la famosa pregunta de Simplicio:

> Muchas veces he pensado en tu forma de razonar; ésta me sugiere que te inclinas hacia la opinión de Platón de que *nostrum scire sit quoddam reminisci*. Por favor, elimina las dudas de mi mente y responde: ¿cuál es tu posición?

Sería un placer poder informar que Salviati replica «Apoyo sin reservas a Platón». Pero en ese momento se reafirma nuevamente la cautela epistemológica de Galileo. Salviati contesta que ya ha expresado lo que piensa acerca de esa opinión platónica con acciones, y no con palabras, y que se propone mantener esa actitud. Pero Galileo, el artista, expresa lo que Galileo, el filósofo, no desea confesar explícitamente. Mediante una serie de preguntas a la manera socrática, conduce a Simplicio a «recordar» una verdad física fundamental acerca del movimiento de un proyectil arrojado con una honda.

> Salv.: Entonces, ¿qué es el movimiento?
> Simp.: Déjame pensar un instante porque ya no tengo una imagen de él en mi mente.
> Salv.: Oye eso, Sagredo: es el *quoddam reminisci* en acción.

Se hace comprender a Simplicio que se imprime ese movimiento a lo largo de una línea recta, pero no lo puede explicar.

> Salv.: Ya veo que comprendes la cosa misma, pero no posees los términos correctos para expresarla. Desde luego te los puedo enseñar; es decir, puedo enseñarte las palabras, pero no las verdades, que son cosas. Y para que puedas sentir que conoces la cosa y sólo te faltan los términos, dime: cuando disparas una bala con un arcabuz, ¿en qué dirección la orienta el ímpetu adquirido?

Simplicio comprende entonces que un proyectil se mueve sobre la tangente de su anterior movimiento circular, pero su mente vacila ante la velocidad de la rotación terrestre. Si se le da suficiente tiempo, recordará todo lo necesario para resolver esta dificultad, pero Salviati apresura el proceso.

> Del mismo modo que sabías antes, sabrás, o mejor dicho, ya sabes también el resto. Y reflexionando sobre ello, también lo recordarías, pero, para ahorrar tiempo, te ayudaré a recordarlo.[53]

Galileo se complace en llevar a fondo su razonamiento. Su mayor triun-

53. *Ibid.*, pp. 217-220.

fo en la Tercera Jornada cuando pone un lápiz en la mano de Simplicio y hace que dibuje las trayectorias de los planetas tal como las recuerda:

> Para tu satisfacción y maravilla, quiero que tú mismo la dibujes. Aunque piensas que no es así, verás que la comprendes perfectamente; y sólo con responder a mis preguntas la describirás puntualmente.[54]

¡El resultado es un diagrama del universo copernicano!

Cuando Simplicio infiere, equivocadamente, que si el movimiento de sesenta millas de un barco determinará una diferencia de un grado en la altura observada de la estrella polar, el movimiento de la tierra debe producir una variación similar, Salviati responde:

> Ésta, Simplicio, es otra equivocación; lo sabes pero no lo recuerdas y trataré de hacer que lo recuerdes.[55]

Los amigos de Salviati atribuyen a su intervención la presencia de nuevas ideas en sus mentes. «Ahora comprendo que has despertado mi intelecto», exclama Sagredo,[56] y en otro pasaje, Simplicio dice: «Tu pregunta ha despertado mi mente».[57] Sócrates no hubiera esperado más de sus interlocutores.

Galileo no era un constructor de sistemas, y nunca dio completa libertad a sus construcciones teóricas. Concordaba con Platón en que el conocimiento de algunos principios naturales es evidente en sí y, en cierto modo, innato; pero destacaba la importancia del experimento para despertar el conocimiento dormido. En último análisis, esto es posible porque la mente humana comparte el conocimiento matemático divino que ha creado y ordenado el universo. En cierto sentido, entre la naturaleza y la mente humana hay una armonía preestablecida que el experimento recuerda en lugar de producir. Por esta razón, nada puede reemplazar a la visión matemática.

El papel de los experimentos

La concepción platónica galileana del procedimiento científico implica el predominio de la razón sobre la mera experiencia: en tanto que Colombo y Lagalla apelan constantemente a la experiencia no dirigida, él apela a las matemáticas para la interpretación de la naturaleza. La distinción esencial no está ya entre lo mental y lo fáctico, sino entre lo

54. *Ibid.*, p. 350.
55. *Ibid.*, p. 403. cursivas del autor.
56. *Ibid.*, p. 409.
57. *Ibid.*, p. 360. Galileo agregó este pasaje en su propio ejemplar del *Diálogo*.

matemático y lo burdamente empírico. Los experimentos –tanto mentales como reales– son igualmente válidos si han sido diseñados de acuerdo con los requisitos de las matemáticas. La transformación espontánea del movimiento «natural» en «violento» queda confirmada lanzando una bala de cañón a través de un túnel imaginario que pasa por el centro de la tierra, y también estudiando las oscilaciones de un péndulo. Galileo reemplaza el enfoque cualitativo de los escolásticos por un método más riguroso en que la medida se torna fundamental, al menos en principio. Salviati insiste en que no es suficiente saber que un cuerpo que cae se acelera constantemente; es menester conocer la razón. Cuando los objetos no permiten la inspección directa, se emplean modelos reales o imaginarios para determinar las relaciones espaciales y temporales básicas para el conocimiento científico. En algunos casos, la búsqueda de simplicidad geométrica y la convicción de que la elegancia matemática es un rasgo exclusivo del copernicanismo ejerce tal control sobre el experimento mental que se puede prever la conclusión.

Incluso el famoso experimento de la piedra arrojada desde lo alto del mástil de un barco es obra de una mentalidad inteligente. En su *Carta a Ingoli*, Galileo dice que ha realizado el experimento, pero «antes de hacerlo –agrega– estaba convencido por completo, mediante el razonamiento, de que el resultado sería exactamente el que fue».[58] En el *Diálogo*, Salviati no repite esta afirmación sino que se limita a decir: «Sin experimentar estoy seguro de que ese efecto ocurrirá como te digo, porque es necesario que ocurra.»[59] Luego conduce a Salviati a deducir el resultado del experimento; no se trata de resolver un problema por métodos puramente experimentales. Salviati llega incluso a proponer dos experimentos alternativos que no han realizado ni contemplado:

> Si quieres obtener un experimento más adecuado, deberías observar, si no por tus ojos físicos, al menos con los de la mente, qué ocurriría si un águila, arrastrada por la fuerza del viento dejara caer una piedra de sus garras.[60]

---

58. Carta a Ingoli (1624), *ibid.*, Vol. VI, p. 545.

59. Galileo, *Dialogo, ibid.*, Vol. VII, p. 171, cursivas del autor. No parece que los contemporáneos de Galileo pensaran que él había realizado el experimento. G. B. Baliani le escribe siete años después de la publicación del *Dialogo* y le informa que ha hecho que un marinero arroje varias veces una bala de mosquete desde lo alto del mástil de un barco en movimiento y que, en todos los casos, la bala ha caído al pie del mástil (carta a Galileo, 16 de noviembre de 1639, *ibid.*, Vol. XVIII, p. 103). Según mi conocimiento, Giordano Bruno fue el primero que se refirió a este experimento como prueba del movimiento de la tierra en *La Cena de le ceneri* (1584), ed. Giovanni Aquilecchia (ed. Einaudi, Turin, 1955), p. 178. Buonamico, el maestro de Galileo en Pisa, menciona la experiencia, aunque su explicación es errónea (Francesco Buonamico, *De Motu* [Florencia, 1591], 452 G).

60. Galileo, *Dialogo, Opere di Galileo*, Vol. VII, p. 169.

Y:

> Verás que ocurre la misma cosa haciendo el experimento en un barco y arrojando una bala perpendicularmente hacia arriba con una catapulta: vuelve al mismo lugar ya sea que el barco esté en movimiento o detenido.[61]

Este experimento no habría encantado precisamente al capitán de ningún barco. Pero aún si Galileo hubiese realizado la experiencia, la cuestión no habría quedado resuelta. Los aristotélicos conocían el resultado supuestamente previsto, pero no le daban la menor importancia. El margen de error era demasiado grande, afirmaban, porque ¿cómo podía mantenerse derecho el mástil si el barco rolaba y si era propulsado por los impulsos irregulares del viento o de los remeros?[62]

Era indigno del filósofo de la naturaleza limitarse a tropezar con la solución correcta obtenida experimentalmente. Cuando Rocco exige a Galileo que explique cuáles son sus fundamentos para afirmar que todos los cuerpos caen a la misma velocidad independientemente de su peso, Galileo responde que estaba «convencido por la razón antes que por los sentidos».[63]

Esta actitud aclara por qué Galileo defendía absurdamente experimentos plausibles en la teoría, pero imposibles en la práctica. Por ejemplo, después de reprochar a Tycho y a Clavius por su descuidada determinación del diámetro aparente de las estrellas, Salviati sugiere un método mejor que, según afirma, ha puesto en práctica muchas veces. Dice a sus dos amigos que ha suspendido un cordel en la dirección donde se encuentra Vega, situándose a la distancia suficiente para que el ancho de la cuerda ocultara la estrella. Por la razón del grosor del cordel y la distancia entre el cordel y sus ojos, determinó así el ángulo subtendido por la estrella, cuidando de «no situar la intersección de los rayos visuales en el centro del ojo, adónde no irían si no fueran refractados, sino más allá del punto donde está el ojo, donde el ancho real de la pupila permitiría su convergencia». Y concluye:

> *Con esta operación muy exacta*, encuentro que el diámetro aparente de una estrella de primera magnitud, que generalmente se cree de dos minutos y que Tycho considera incluso de tres en sus *Cartas Astronómicas*, página 167, no es superior a los cinco segundos, es decir, veinticuatro o treinta y seis veces menos de lo que se pensaba. Ya veis pues en qué grave error se funda su doctrina.[64]

---

61. *Ibid.*, p. 200.
62. Ludovico Colombo, *Contro il moto della terra*, *ibid.*, Vol. III, pp. 259-260.
63. Apostilla a las *Esercitazioni Filosofiche* de Antonio Rocco, *ibid.*, Vol. VII, p. 731.
64. Galileo, *Dialogo*, p. 389, cursivas del autor.

Galileo no era incapaz de forzar un argumento para desacreditar a un adversario. Está más allá del arte de la experimentación la obtención de tales resultados con tal método. Probablemente ocurrió lo siguiente: el telescopio reveló que las estrellas no eran tan grandes como en general se creía porque no se magnificaban sino que se reducían. Este conocimiento permitió a Galileo diseñar –mentalmente– un experimento que sus predecesores podrían haber realizado sin el nuevo instrumento, y que les habría permitido determinar el tamaño relativo de las estrellas. El método que sugiere es matemáticamente ingenioso, pero nada práctico experimentalmente. Como la pupila se dilata y contrae en presencia de la luz, el punto de convergencia de los rayos nunca es el mismo. Salviati reconoce la dificultad, pero cree que se puede determinar la convergencia de los rayos colocando una cinta blanca de papel en el muro y colgando una cinta negra de la mitad de ancho unos quince brazos más cerca. Si la visión se realizaba en un solo punto, la cinta blanca quedaría escondida. Como no es así, el ojo debe desplazarse hacia adelante desde el punto de la intersección de los rayos visuales. Salviati sostiene que se puede determinar con este método la dilatación de la pupila, puesto que el diámetro de la pupila dilatada está en la misma razón al ancho de la cinta como la distancia entre el ojo y la intersección de los rayos a la distancia total de quince brazos. ¿Pero cómo podía realizarse este experimento en mitad de la noche? ¿Y cómo resolver la refracción producida por la pupila? El hecho de que Galileo no haya enfrentado estas dificultades demuestra suficientemente que nunca hizo la experiencia.

En un pasaje posterior, Galileo critica las tentativas de sus predecesores para determinar la existencia de paralaje en las estrellas distantes. Se queja de que sus medidas, incluso las de Tycho Brahe, eran demasiado burdas, y sugiere un método que se le ha ocurrido mientras contemplaba la puesta del sol desde su villa próxima a Florencia, en el solsticio de verano. Había observado que el sol descendía detrás de un risco de las montañas Pietropana, situadas a unas setenta millas, «dejando sólo un pequeño jirón visible al norte, cuyo ancho no era la centésima parte de su diámetro».[65] La noche siguiente, el jirón era perceptiblemente más angosto, aunque el desplazamiento solar entre la primera y la segunda observación era menor que un segundo arco. Parecía, por tanto, que la naturaleza misma proporcionaba un instrumento inmenso para determinar la posición relativa de los cuerpos celestes en el período de un año. Esta sugestiva idea, que sólo se le ocurrió a Galileo en 1631, atestigua la vitalidad de su mente y la lucidez de su imaginación científica a sus sesenta y siete años.[66] Nos queda la duda, sin embargo, de que haya

65. *Ibid.*, p. 414.
66. Carta a Cesare Marsili, 5 de abril de 1631, *ibid.*, Vol. XIV, p. 240.

pensado mucho realmente en la medida del paralaje antes de escribir el *Diálogo*.

Por otra parte, Galileo sabía que, por lo menos en principio, el resultado del razonamiento matemático debía comprobarse con la verificación empírica. Esto carecía de importancia para sus adversarios aristotélicos, que veían la ciencia a una luz diferente. Ellos aceptaban la interpretación instrumentalista de la astronomía y consideraban que una explicación en los términos de las necesidades humanas era más real que una explicación en los términos de las causas eficientes, que conducían al uso regulador de los experimentos. El mundo, tal como ellos lo veían, existía para el goce, el uso y la instrucción del hombre; estaba subordinado a él y sólo en relación con él tenía sentido. El reino de la naturaleza no sólo estaba centrado en la tierra sino también en el hombre. Es en gran medida a causa de la revolución de Galileo que hemos llegado a considerar esta actitud como un ejemplo de arrogancia intelectual. Cuando Simplicio dice que nada se ha creado en vano, y que el espacio vacío entre la órbita de Saturno y la esfera de las estrellas no podría tener ningún fin, instintivamente nos sentimos de acuerdo con la crítica de Sagredo:

> Di mejor, pues creo que es mucho más apropiado, «que no sabemos qué cosa nos sirve... tampoco sé yo cómo me sirven mis arterias, cartílagos, bilis o bazo. Ni siquiera sabría que existen la bilis, el bazo o los riñones si no me los hubieran mostrado en un cuerpo disecado. Incluso en ese caso puedo sólo comprender para qué me sirve el bazo cuando ha sido eliminado. Para comprender qué produce en mí un cuerpo celeste (ya que quieres que todas sus acciones se dirijan hacia mí) sería preciso suprimir por un rato ese cuerpo y ver qué efectos siento que faltan en mí, y que dependían de esa estrella.[67]

Cuando Salviati estudia el reforzamiento de una piedra imán con una armadura de hierro, muestra el procedimiento correcto que se debe seguir científicamente:

> Primero establecí que la virtud y la fuerza de la piedra no aumentaban por tener una armadura, puesto que no atraía a través de una distancia mayor... Por lo tanto, no hay cambio en la virtud, y sin embargo hay innovación en el efecto. Como para un nuevo efecto debe haber una nueva causa, buscamos qué cosa nueva se había introducido con el acto de sostener el hierro con la armadura; y nada se halló más que una diferencia en el contacto, porque donde antes el hierro tocaba la piedra imán, ahora el hierro toca el hierro. Por lo tanto, debemos concluir que la diferencia de esos contactos causa la diferencia de los resultados. Finalmente, no puedo ver que la diferencia entre los contactos provenga de ninguna otra cosa

67. Galileo, *Dialogo, ibid.*, Vol. VII, p. 395.

que del hecho de que las partes de la sustancia del hierro son más sutiles, más puras y más densas.[68]

Sin embargo, la teoría de ningún modo pierde su voz autoritaria. Galileo rechaza la conjetura de Gilbert (cuando afirmaba que una piedra imán esférica podía girar sobre su eje si estaba en un medio fluido), no porque contradijera experimentos bien definidos sino su teoría de que todas las partes del globo terrestre tienen tendencia natural a girar alrededor de la tierra una vez cada veinticuatro horas.[69] En cierto sentido, no es necesario realizar el experimento; dado el marco de referencia contextual en que Galileo lo habría realizado, sólo un resultado era posible.

Un caso particularmente interesante es el tiempo de caída libre que da Galileo en el *Diálogo* y que tanto asombró a sus contemporáneos con sentido de la experimentación como Mersenne y Baliani. En la primera edición del *Diálogo* hay dos pares de valores distancia/tiempo para un cuerpo en caída libre. Estos dos pares que corresponden a una aceleración gravitacional de aproximadamente la mitad del valor generalmente aceptado son: (1) una caída de 200 brazos (*braccia*) en menos de 10 pulsaciones,[70] y (2) una caída de 100 brazos en 5 segundos.[71] Como 1 brazo mide aproximadamente 22 pulgadas (55,88 cm), si suponemos que el pulso normal es de 72 pulsaciones, los datos de Galileo corresponden respectivamente a aceleraciones de (1) más de 3,05 m/seg^2 y en el caso (2), de 4,27 m a 4,57 m/seg^2. Si se interpreta libremente la expresión «más de», se puede considerar que ambos valores son coherentes entre sí. Como señala David C. Lindberg, si suponemos una cantidad de pulsaciones inferior a 72, entonces la aceleración se torna menor de 3 m/seg^2; si la aumentamos a 90 pulsaciones, la aceleración aumentará sólo en 3 m/seg^2, dejando todavía una discrepancia del 50 por ciento, pero acercando el valor (1) al valor (2).[72]

En su copia del *Diálogo*, Galileo agregó un tercer par de valores distancia/tiempo, que dan (con 72 pulsaciones por minuto) una aceleración gravitacional de 9,60 m/seg^2, es decir, casi exactamente el valor moderno.[73] ¿Cómo explicar la diferencia entre este nuevo valor y los otros dos? David C. Lindberg propone una explicación basada en los hechos siguientes: primero, Mersenne no había tenido aparentemente difi-

68. *Ibid.*, p. 433.
69. *Ibid.*, p. 440.
70. *Ibid.*, p. 46.
71. *Ibid.*, p. 250.
72. David C. Lindberg, «Galileo's Experiments on Falling Bodies», *Isis*, n.º 56, 1965, p. 352.
73. Galileo, *Dialogo*, *Opere di Galileo*, Vol. VII, p. 54. Pasaje agregado por Galileo en su ejemplar del *Diálogo*.

cultades para conseguir resultados más exactos,[74] y segundo, se puede demostrar que los experimentos de Galileo con bolas lanzadas por planos inclinados arrojan los datos que él proporcionaba.[75] Lindberg sugiere que, para los fines de la exposición, Galileo trasladaba la información obtenida con bolas rodando por un plano inclinado a datos de caída vertical. La introducción de la rotación (cuya dinámica Galileo no comprendía) no altera la proporción entre la distancia y el cuadrado del tiempo, pero reduce considerablemente la aceleración. Suponiendo que hubiese un solo punto de contacto entre la bola y el plano inclinado, y ninguna resistencia por fricción, la inercia rotacional reduciría la aceleración gravitacional traspuesta a datos de caída libre en un 28 por ciento. La resistencia por fricción, o la existencia de dos puntos de contacto entre la bola y un plano inclinado estriado, podían explicar fácilmente el resto de la diferencia entre los resultados de Galileo y el valor aceptado de la aceleración gravitacional. Pero, ¿y el tercer par de valores correctos? Lindberg sugiere que fueron obtenidos midiendo realmente cuerpos en caída libre: «No habría habido problema para encontrar una torre suficientemente alta –el campanario de Pisa tiene apenas más de 100 brazos de altura y con la mitad sería suficiente– para permitir una medida del tiempo con una precisión de 5 o 10 por ciento». Pero entonces, ¿por qué no corrigió Galileo los otros dos pares de datos? «Esto se podría explicar –responde Lindberg– por su incapacidad de elegir un par de datos y desechar los otros».[76] La principal objeción a esta interpretación es que el tercer par de valores aparece cuando Simplicio se refiere a un experimento realizado con una bola de 100 libras de peso. Es difícil que Galileo haya podido realizar esta experiencia en cualquier torre, la de Pisa o no, «puesto que 100 brazos es más de 55 metros, 100 libras son 100 libras, y Galileo sufría de una hernia doble que le obligaba a usar un braguero de hierro».[77]

G. B. Baliani quedó perplejo con los datos de Galileo. El 23 de abril de 1632 le escribió: «Te agradecería que me dijeras cómo has establecido que un cuerpo pesado cae 100 brazos en 5 segundos». Siete años más tarde, sin haber recibido respuesta, reiteró su pedido.[78] Finalmente, Galileo respondió explicando cómo se podía determinar la velocidad de la

74. Sostenía que, después de haber repetido muchas veces la experiencia, la distancia recorrida era siempre mayor (tiempos equivalentes) que la citada por Galileo (Marin Mersenne, *Harmonie Universelle*, t. I [Paris, 1637], citado por A. Koyré, «An Experiment in Measurement», *Proceedings of the Am. Phil. Soc.*, n.º 97 (1953), pp. 227 y 235-236).

75. Thomas B. Settle, «An Experiment in the History of Science», *Science*, n.º 133 (1961), pp. 19-23.

76. Lindberg, «Galileo's Experiments», p. 354.

77. Stillman Drake, «Free Fall in Galileo's *Dialogue*», *Isis*, n.º 57 (1966), p. 270.

78. Cartas a Galileo del 23 de abril de 1632 y el 1.º de julio de 1639. *Opere di Galileo*, Vol. XIV, p. 343; Vol. XVIII, p. 69.

caída vertical mediante experimentos con planos inclinados, el método que, según la conjetura de Lindberg, Galileo había utilizado. Pero no hay mención alguna del valor correcto, y se tiene la impresión de que Galileo confiaba más en la validez del método que en la precisión de sus medidas.

> Ésta es la técnica (artificio), y creo que la hallarás exacta incluso si al hacer el experimiento encuentras que lo que he escrito –100 brazos en 5 segundos– está equivocado. Para demostrar la increible tontería del escritor que estableció el tiempo de caída de una bala de cañón lanzada desde la luna no era importante que fueran exactos los 5 segundos ni los 100 brazos.[79]

Por lo tanto, se puede considerar esa elección de números redondos –100 unidades de espacio y 5 de tiempo– como una forma cómoda de ejemplificar su punto de vista y no como una afirmación seria acerca de la naturaleza. Pero, ¿cuál era exactamente el punto de vista que deseaba destacar Galileo? Simplemente, que un experimento matemáticamente estructurado dará resultados válidos, y que la física matematizada puede revelar las leyes de la naturaleza a pesar de lo que se complacen en afirmar los aristotélicos por medio de su vocero Simplicio: «En las ciencias físicas, no es necesario buscar la precisión de la evidencia matemática».[80]

Galileo condesciende a dar, en sus comentarios a las *Esercitazioni Filosofiche* de Antonio Rocco, la explicación personal de cómo ha detectado y corregido la falsedad de la ley aristotélica de la caída libre. Al leer el pasaje en que Aristóteles afirma que la velocidad de los cuerpos que caen es proporcional a su peso, había sentido instintivamente que algo estaba mal. Recordaba haber visto piedras de granizo diez veces más grandes que las corrientes y que caían al suelo mezcladas con las otras sin precederlas apreciablemente. «Seguí pensando en esto y llegué a un axioma que nadie podría poner en duda, por el cual los cuerpos pesados caen con su propio grado de velocidad limitado y determinado por la naturaleza». Luego estudió el caso de dos ladrillos arrojados desde la misma altura. Como ambos llegaban al suelo al mismo tiempo, no vio ninguna razón para que se condujeran en forma distinta si estaban atados.

> De este primer argumento pasé a una demostración más rigurosa y comprobé que, si suponíamos que el cuerpo más pesado caía más rápido, deberíamos concluir que el cuerpo más ligero también caería más rápido.[81]

---

79. Carta a G. B. Baliani, 1.º de agosto de 1639, *ibid.*, Vol. XVIII, p. 77. De aquí, el par distancia/tiempo meramente ilustrativo citado en los *Discorsi*: 4 segundos para la caída desde lo alto de una lanza («picca»). (Galileo, *Discorsi*, *ibid.*, Vol. VIII, p. 287).

80. Galileo, *Dialogo*, *ibid.*, Vol. VII, p. 256.

81. Apostilla a las *Esercitazioni Filosofiche* de Antonio Rocco, *ibid.*, p. 731.

La demostración, que había elaborado en Pisa, consistía en que tan lógico era sostener que un cuerpo ligero sustrae velocidad del cuerpo pesado al que está unido, como suponer que ambos cuerpos caen más rápido porque su peso total es mayor.

La ley de igual aceleración no se cumple como tal, explicaba Galileo, a causa de los efectos retardantes del medio. Éstos son de varias clases. Primero, la resistencia del medio a separarse; segundo, el peso específico del medio que, en algunos casos, por ejemplo el del agua con respecto a la madera, invierte por completo el movimiento; tercero, la forma del cuerpo, que puede ser más o menos capaz de cortar el medio; y finalmente, «una nueva resistencia que, según creo, hasta hoy no ha sido observada... consistente en el contacto entre el medio fluido y la superficie del cuerpo que se mueve».[82] Son ejemplos de esta resistencia una esfera bien pulida que arrastra el aire consigo mientras gira, y un barco que no logra avanzar porque el casco no está engrasado. Además, como la división no reduce la superficie y el peso de un cuerpo en la misma razón, un cuerpo muy pequeño (como un grano de arena) tiene una gran superficie en relación con su peso y está mucho menos sujeto, por lo tanto, al efecto retardante del medio. Galileo señala también (y éste es un gran descubrimiento) que los cuerpos que caen no se aceleran indefinidamente sino que llegan a una velocidad terminal. Los cuerpos pesados se aceleran durante un período más largo de tiempo, y por lo tanto se mueven a mayor velocidad cuando su movimiento se torna uniforme.

Pero no es posible eludir el asunto principal: si Galileo admite que los cuerpos no caen a la misma velocidad porque el medio ofrece cierta resistencia, aunque sea mínima, su ley es falsa o se cumple mejor en el vacío, lo que parece igualmente falso puesto que Aristóteles había demostrado la imposibilidad del vacío. Galileo responde demostrando que el argumento de Aristóteles, fundado en el postulado de que la velocidad es proporcional a la viscosidad del medio, involucra una paradoja. Si el agua es 10 veces más viscosa que el aire, y una castaña de pino cae en el aire a 20 grados de velocidad, en el agua debería caer a 2 grados de velocidad. Pero no es así, porque una castaña de pino flota. Ahora bien: es teóricamente posible encontrar un cuerpo más pesado que una castaña y que se hunda en el agua a 2 grados de velocidad. Por lo tanto, según Aristóteles, en el aire debería caer a 20 grados de velocidad. Pero ésta es la velocidad de caída de una castaña de pino que, por definición, es más ligera que el cuerpo antes mencionado. Por lo tanto, el argumento de Aristóteles lleva una contradicción y debe estar, en consecuencia, necesariamente apoyado en una falacia.

La posibilidad lógica del vacío no lo hace automáticamente relevan-

82. *Ibid.*, pp. 735-736.

te para los problemas físicos. Galileo no elude esta dificultad esencial. ¿Es buena filosofía, y buena ciencia, ir más allá del reino de los acontecimientos normales? ¿No es peligroso buscar una interpretación de la naturaleza mediante extrapolaciones que conducen más allá de sus límites aparentes?

La revolución científica nos ha enseñado que, al obligar a la naturaleza, por así decirlo, a hacer lo que naturalmente no haría, con frecuencia surgen nuevas verdades acerca de la estructura del universo. Para nosotros, trescientos años de ciencia experimental confirman esta aseveración. Para los contemporáneos de Galileo, y para Galileo mismo, que dudaba incluso de la posibilidad experimental de producir un vacío, era un salto de la fe.

> Finalmente debemos evitar el peor escollo y explicar por qué conjeturas (ya que quizá sea imposible hacer el experimento) me he permitido creer que las velocidades innatas de todos los cuerpos, cayendo en el vacío, debían ser idénticas.[83]

Explica luego que, como la diferencia de velocidad entre cuerpos de diversos pesos que caen disminuye a medida que disminuye la densidad del medio, ha inferido que, si la resistencia fuera cero, la diferencia sería nula. Galileo no aporta más pruebas; propone liberar al método científico «de la tendencia al empirismo excesivo que era el principal defecto de la tradición aristotélica».[84] Las dos suposiciones erróneas del razonamiento de Antonio Rocco se explican por su servidumbre a la experiencia cotidiana. Son, en primer lugar, la idea, aparentemente plausible, de que, como los cuerpos caen porque son pesados, caerán más rápido si son más pesados; y, en segundo lugar, la noción igualmente obvia en apariencia de que el medio es un aspecto esencial de la ley de los cuerpos que caen, y no meramente un factor perturbador.

La inverificable ley de la aceleración uniforme sólo se podía establecer en el inalcanzable vacío. Para el aristotélico, ésta era una barrera infranqueable. Para Galileo, probaba simplemente que las fronteras de la ciencia no son las mismas que las fronteras de la experiencia. Sólo «imaginando una situación imposible se podría formular una ley de la caída clara y simple; y sólo poseyendo esa ley sería posible comprender las cosas complejas que realmente ocurren».[85] Se puede, y en realidad se debe, ir más allá de la experiencia de los sentidos, pero esto presupone la convicción filosófica de que lo real es descrito por lo ideal y lo físico por lo

83. *Ibid.*, pp. 742-743.
84. A. C. Crombie, *Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science* (ed. Clarendon Press, Oxford, 1953), p. 305.
85. A. Rupert Hall, *From Galileo to Newton*, p. 63.

matemático. No es casual que Galileo concluya su estudio de la ley de caída libre recordando a Rocco el más grande de los filósofos y la más noble de las ciencias.

> Rocco, una vez que hayas pesado, examinado y comparado cuidadosamente tus argumentos y los míos, recuerda el dicho de los filósofos, *ignorato motu ignoratur natura*, y pesa con una balanza honesta cuál de las dos formas de filosofar alcanza su meta, la tuya, simple y puramente física, o la mía, condimentada con una pizca de matemáticas. Al mismo tiempo, considera quién ha razonado mejor, si Platón, para quien no podemos aprender filosofía sin matemáticas, o Aristóteles, que acusaba a Platón de estudiar demasiada geometría.[86]

LOS DOS MUNDOS

El mundo teleológico

La Edad Media redescubrió y entregó a sus sucesores una visión mundial heredada de los griegos, cuya principal preocupación no era buscar hechos nuevos sino hallar una justificación completa del orden mundial. No les interesaba la predicción ni las explicaciones detalladas, sino estudiar la forma en que las cosas se integraban en todo un conectado, racional y estéticamente satisfactorio. Posteriormente, bajo la influencia de la teología judeocristiana, esto condujo a la creencia de que todo el reino de la naturaleza estaba teleológicamente subordinado al hombre y a su destino eterno.

En esta concepción hay algo neto y ordenado que no sólo gratifica la mente sino que agrada a la vista. La imaginación dispone de una imagen ordenada del mundo en que cada cosa tiene su lugar adecuado. Con el tiempo, esta imagen del mundo adquirió una engañosa evidencia que no fue desmentida por falta de una alternativa mejor. El hombre podía maravillarse ante las dimensiones del universo, pero no dudaba de que había sido creado para su uso y beneficio. La astrología era popular y respetable, porque se aceptaba en general que los asuntos humanos debían prosperar si se emprendían de acuerdo con la adecuada conjunción de estrellas. Simplicio daba por sentado que los cuerpos celestes «no tienen otra finalidad que servir a la tierra».[87] Repudiaba el espacio vacío que los copernicanos deseaban introducir entre Saturno y la esfera de las estrellas:

---

86. Apostilla a las *Esercitazioni Filosofiche* de Antonio Rocco, *Opere di Galileo*, Vol. VII, p. 744.
87. Galileo, *Dialogo*, *ibid.*, p. 84.

> Ahora bien, cuando vemos el bello orden de los planetas, dispuestos en torno de la tierra a distancias proporcionadas para que produzcan en ella efectos destinados a nuestro beneficio, ¿por qué poner entre la órbita más alta, es decir, la de Saturno, y la esfera de las estrellas, un enorme, vano y superfluo espacio sin ningún astro? ¿Para qué fin? ¿Para el uso y conveniencia de quién?[88]

Bajo estas cuestiones retóricas había un método filosófico e incluso una filosofía de la vida. Según este punto de vista, antes de entrar en el detalle de construir y poner a prueba la hipótesis copernicana, era preciso saber si «se ajustaba a la razón». No tiene sentido construir un nuevo edificio intelectual y ni siquiera estudiar su diseño mientras no sea evidente que es posible. En el contexto aristotélico no había hipótesis de trabajo; sólo teorías completas.

Como el universo, en su conjunto, se comparaba a un organismo vivo, se suponía que las comparaciones extraídas de la conducta humana constituían explicaciones suficientes. De este modo, Simplicio podía explicar el magnetismo en términos de «simpatías» y «antipatías»:

> Reducimos la causa de este efecto natural y otros similares a la simpatía, que es una cierta correspondencia y afinidad que surge entre cosas de similar cualidad, así como llamamos antipatía ese odio y enemistad por cuya causa otras cosas naturalmente se apartan o aborrecen.[89]

Sería injusto, sin embargo, suponer que los instrumentos conceptuales de los peripatéticos eran en todos los casos igualmente crudos y primitivos. Sus herramientas intelectuales eran elevadamente sofisticadas y les permitían resolver los eternos rompecabezas de la filosofía como, en particular, el problema de la identidad y el cambio. Aristóteles explicaba la continuidad y la novedad en el cambio postulando que los cuerpos físicos poseían una estructura especie/individuo. Un cuerpo comparte las propiedades comunes de los miembros de su clase a causa de su forma; pero es su propio ser individual a causa de su materia. La forma individualizada por la materia o también –para decirlo de otra manera– la materia hecha real por la forma constituía la sustancia material. A su vez, afectaban la sustancia los accidentes, que le atribuían cualidades, pero sin alterar su naturaleza. El cambio era posible porque la forma nunca estaba tan perfectamente unida a la materia que no fuera posible su expulsión y su posterior reemplazo. Sin embargo, en el caso de los cuerpos celestiales, no podían ocurrir cambios porque la forma estaba completamente soldada a la materia y agotaba todas sus potencialidades. Se resolvía el problema de que estos cuerpos perfectos pudieran ac-

88. *Ibid.*, p. 394.
89. *Ibid.*, p. 436.

tuar sobre los cuerpos sublunares sin contacto físico mediante la analogía con la conducta humana en que la voluntad, una facultad espiritual, produce movimientos corporales sin actuar de modo físico.

La sofisticación misma de esta filosofía presentaba un riesgo. Si bien las mentes sutiles podían hablar de materia y forma como una estructura, los pensadores realistas, más ingenuamente, tendían a suponer que saber que un objeto tenía una forma era conocer cuál era esa forma. Las categorías aristotélicas tendían a convertirse en las únicas en que se podían estudiar legítimamente los problemas de la filosofía natural. Por ejemplo, la crítica de Colombo intentaba demostrar que el concepto copernicano de fuerza no podía ser sustancia ni accidente y pertenecía, por lo tanto, a un limbo metafísico. Por la misma razón, Simplicio rechazaba el concepto de «fuerza imprimida» *(virtù impressa)*.

Este modelo teleológico del universo, con su panoplia de categorías metafísicas, encontró un aliado en el empirismo cerril, es decir, en la creencia de que lo real es aquello que se percibe inmediatamente a través de los sentidos. Ésta es la concepción que llevaba a los adversarios de Galileo a asumir que siempre se debía estudiar un fenómeno en la forma complicada en que se presentaba. Se consideraba que el medio era un aspecto esencial y no meramente un factor perturbador. Y por esta razón llegaban a la suposición, igualmente plausible en apariencia e igualmente errónea en la realidad, de que, como un cuerpo pesado tiende a caer con más fuerza que un cuerpo ligero, debía caer más rápido si se permitía su caída libre.

Los armónicos teleológicos y metafísicos de este empirismo apartaban de la mente todo deseo de realizar experimentos. Según el modelo orgánico, se describía mejor la aceleración constante de los cuerpos que caen en términos cualitativos, como un aumento de la fuerza. No se podía plantear la exigencia de rigor y precisión –ni por tanto la exigencia de medidas exactas– dentro de un marco de referencia que no admitía la geometrización de la forma y la cualidad. Como recordaba Simplicio a su amigo, «Después de todo, Salviati, las sutilezas matemáticas son verdaderas en abstracto, pero no responden cuando se aplican a la materia física y sensible.»[90]

El mundo matemático

A los dos pilares básicos del empirismo aristotélico –la teleología antropocéntrica y la confianza en las revelaciones inmediatas de la experiencia sensorial– Galileo oponía los dos principios principales del pla-

90. *Ibid.*, p. 229.

tonismo matemático: la armonía geométrica del universo y la creencia en el poder explicativo de las matemáticas.

Sería erróneo afirmar que Galileo eludía el problema de la posición privilegiada del hombre en el cosmos o que no sentía su impacto en su conciencia intelectual. Galileo veía que esa posición no procedía del hecho de ocupar el centro espacial del universo, sino de su capacidad de abrazar el mundo entero con la comprensión de sus estructuras matemáticas. Si debemos pensar con imágenes espaciales, es más apropiado decir que el intelecto humano ciñe el universo que concebirlo instalado en el centro de las cosas. Dios está arriba, en el firmamento, y el hombre comparte el atributo divino del conocimiento matemático.

Como para Galileo lo que define una explicación científica ya no es el análisis en términos de acto y potencia, materia y forma, sino una teoría matemática verificable en la naturaleza, rechaza el concepto mismo de cambio sustancial. En la nueva perspectiva sólo es susceptible de tratamiento matemático –y por lo tanto inteligible– «una simple transposición de partes». Los aristotélicos se envilecen con las palabras. Cuando se le pregunta a Salviati si la fuerza motora de los planetas es inherente o externa, se confiesa ignorante; pero se trata aquí de la ignorancia de Sócrates, que revela el falso conocimiento de quienes pretenden saber. Si sus adversarios pueden decirle qué mueve los planetas y a las estrellas, él habrá encontrado la fuerza que mueve la tierra. Simplicio responde que, como todo el mundo sabe, la causa es el peso. «Te equivocas, Simplicio –dice Salviati–, deberías decir que todo el mundo sabe que se llama peso. Pero no te pregunto el nombre, te pregunto la esencia de la cosa y no sabes más acerca de la esencia que sobre la esencia de lo que mueve a las estrellas, sea lo que sea». Lo mismo puede decirse de la *virtù impressa* o de la *intelligenza assistente* o *informante*.[91] Son meros nombres de irregularidades observadas.

En el *De Motu*, Galileo había tratado de establecer que el peso era la única propiedad natural de los cuerpos, y que la levedad era un mero nombre para la elevación de los cuerpos impulsados hacia arriba por un medio más denso. El peso es, a lo largo de toda la obra de Galileo, la causa de la caída de los cuerpos; pero su oposición epistemólogica se oscurece con el estudio de la naturaleza de los cuerpos en *El ensayador* (1623), donde el peso no está incluido entre las propiedades «sin las cuales no se puede concebir un cuerpo» ni entre aquellas que resultan de la interacción de esas propiedades básicas con el aparato sensorial. Este aspecto sorprendente procede del enfoque geométrico de Galileo. Las propiedades que estudia son estrictamente euclideas. No hay razón para que los cuerpos caigan, y sin embargo lo hacen. Apenas quedan en liber-

91. *Ibid.*, p. 261.

tad, espontáneamente empiezan a moverse hacia el suelo. Éste es el hecho empírico que los diferencia de las construcciones puramente geométricas. «En d'autres termes –escribe Koyré– la gravité est la seule propriété physique qu'ils possèdent. Les corps *physiques* archimédiens sont donc graves, en quelque sorte, par définition. Et c'est pour cela qu'ils sont mobiles, ce que les corps géométriques ne sont aucunement».[92] Galileo se limita al nominalismo porque no conoce la naturaleza del peso. Pero, como observa E. J. Dijksterhuis, «ésta es una limitación que se impone a sí mismo, y no a la ciencia».[93] Galileo estaba firmemente convencido de que el peso era una fuerza similar al magnetismo, y de que el globo terrestre era un enorme imán. Pero a pesar de sus reiterados esfuerzos, no logró establecer una teoría satisfactoria, es decir, un modelo de relaciones deducido por razonamientos matemáticos de principios que parecían más o menos evidentes en sí.

Él mismo cae, por lo menos dos veces, en la poco explícita terminología cualitativa que en general consideraba la plaga de la filosofía. En una ocasión atribuye el hecho de que la luna muestre siempre la misma cara a la tierra «a una correspondencia y simpatía natural» entre los dos cuerpos, y en otro contexto explicaba la mayor potencia de un imán con una armadura de hierro por la transmisión de la *virtù* de la parte exterior de la armadura. Esta última es una contradicción particularmente grave porque poco después se burla de Simplicio cuando habla de «simpatías» y «antipatías».

Mucho más importante es aún que Galileo siga considerando el movimiento natural como una tendencia, una inclinación, un instinto natural.[94] La principal objeción al movimiento diurno de la tierra se resuelve atribuyendo a la tierra una tendencia natural a girar en torno del centro de su masa una vez cada veinticuatro horas. En otras palabras, la respuesta a los aristotélicos, para quienes la tierra estaba naturalmente en reposo, era postular que se movía naturalmente en círculo. Galileo no llegó a formular la primera ley del movimiento de Newton no porque deseara postular un universo infinito (aunque jamás se comprometió con esta idea) sino porque debía hacer que la inercia circular fuera la piedra fundamental de su sistema heliocéntrico para responder a las objeciones de sus adversarios.

Aristóteles concebía el movimiento uniforme como un equilibrio entre fuerza y resistencia. Galileo justificaba del mismo modo su inercia circular:

---

92. Koyré, *Etudes Galiléennes*, pp. 245-246.

93. A. J. Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture*, trad. de C. Dikshoorn (ed. Clarendon Press, Oxford, 1961), p. 338.

94. La terminología de Galileo es reveladora. En la Primera Jornada del *Diálogo*, emplea los términos *inclinazione, instinto, repugnanza, affezione, natural simpatia* y *corrispondenza*. En la Segunda Jornada, agrega *talento* y *appetito*.

> La aceleración se produce en el móvil cuando se acerca a una meta hacia la que tiene inclinación; y el retardo ocurre por su repugnancia a dejar ese punto y alejarse de él; y como en el movimiento circular el móvil siempre se aleja de su término natural y siempre se mueve hacia el mismo, la repugnancia y la inclinación tienen siempre igual fuerza. La consecuencia de esta igualdad es una velocidad que ni se retarda ni se acelera, es decir, un movimiento uniforme.[95]

Es interesante destacar que Galileo no llegó a su concepto de inercia estudiando el movimiento de un proyectil; probablemente fue consecuencia de un interrogante muy distinto del que había puesto a prueba el ingenio de Buridan, de su discípulo Oresme y de los demás exponentes de la teoría medieval del ímpetu.[96] En la primera versión del *De Motu*, Galileo aceptaba la división aristotélica de los movimientos en «naturales» y «violentos»; pero a medida que desarrolló, siguiendo a Arquímedes, la idea de que todos los cuerpos son pesados y sólo difieren en su densidad, llegó a preguntarse si no ocurría que todos los movimientos eran naturales, o todos violentos. Un cuerpo podía estar en movimiento sin acercarse al centro de la tierra ni alejarse de él; el movimiento de un cuerpo semejante, girando alrededor del centro de la tierra, no se podía llamar natural ni violento sino «neutral». Galileo no era original cuando señalaba que una esfera homogénea giratoria no se ajustaba a las categorías aristotélicas del movimiento. Antes que él, otros habían seguido una línea de pensamiento similar. Lo que era nuevo en el análisis de Galileo era la idea de que ese movimiento pertenecía a una tercera clase, y no era una mezcla de las otras dos. Otro enfoque procedía de un caso diferente, el de la fuerza requerida para sostener a un cuerpo en un plano inclinado. Analizando esta situación, Galileo concluyó que el movimiento horizontal de un cuerpo sobre la superficie de la tierra no podía ser natural ni violento, puesto que una línea horizontal en la superficie de la tierra era una pequeña parte de la circunferencia terrestre. La imagen principal, desde el *De Motu* hasta el *Diálogo*, es la de una esfera perfecta girando sobre su eje o describiendo un círculo. Esta imagen se podía estudiar dentro de la terminología aristotélica de la fuerza y la resistencia, pero pertenecía al mundo platónico de las formas ideales.

---

95. Galileo, *Dialogo. Opere di Galileo*, Vol. VII, p. 56. Pasaje agregado por Galileo en su ejemplar del *Diálogo*.

96. Ver Marshall Clagett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages* (ed. University of Wisconsin Press, Madison, 1961), pp. 505-540.

7

LA PRUEBA FÍSICA DE LAS MAREAS: LA CUARTA JORNADA DEL *DIÁLOGO*

EL CONTEXTO DEL DESCUBRIMIENTO

Francis Bacon y Galileo escribieron sendos tratados sobre las mareas en la segunda década del siglo XVII. Bacon, que no era un científico profesional sino un aficionado bien informado, comienza su trabajo presentando las evidencias que la observación torna inmediatamente accesibles a cualquier persona interesada en el problema. Reconoce el *ciclo diario* en que las altas y bajas mareas se repiten a intervalos de doce horas; el *ciclo mensual*, en que las mareas se retrasan cincuenta minutos por día hasta que dan la vuelta al reloj y retornan al punto original; el *ciclo semimensual* con mareas altas durante la luna llena y la luna nueva y mareas bajas en los cuartos, y finalmente el *ciclo semianual*, con mareas mayores en los equinoccios que en los solsticios.[1]

El fenómeno de las mareas atrajo la atención de los estudiosos renacentistas. Se contemplaban varias hipótesis, que se pueden resumir en la forma siguiente:

1) La interpretación animista de las mareas de Apolonio, como una analogía de la respiración, aparece en el *De Situ Elementorum*, publicado en 1558 por Antonio Ferrari, llamado Galateo. Aparentemente, no muchos contemporáneos de Galileo la compartían.[2]

2) Los aristotélicos, que recibían su inspiración de una observación casual de Aristóteles en la *Meteorología*, sostenían que la pendiente na-

1. Francis Bacon, *De fluxu et refluxu maris* en *The Works of Francis Bacon*, ed. Spedding *et. al.*, 14 vols. (Londres, 1857), vol. 3, p. 47. Había información inmediatamente asequible acerca de los tres periodos en dos obras que G. B. Baliani (carta del 23 de abril de 1632, *Opere di Galileo*, Vol. XIV, p. 343) recomendó a Galileo. Son *L'arte del navegar* (Venecia, 1554), pp. 123*r*, 123*v*, 126*r*, de Pietro da Medina, y el *Speculum nauticum* de Lucas Waghenaer, conocido como Aurigarius, Leiden 1586, p. 29. En relación con la explicación de las mareas de Bacon, ver Paolo Rossi, *Aspetti della rivoluzione scientifica* (ed. Morano, Nápoles, 1971), pp. 151-222.

2. Antonio Ferrari [Galateo], *Liber de situ elementorum* (Basilea, 1558), p. 91. Bacon (*Works*, vol. 3, p. 50) atribuye esta opinión a Apolonio.

tural del Mediterráneo y los vientos eran las causas principales de las mareas.[3]

3) Escalígero intenta explicar las mareas por alguna forma de simpatía entre la luna y el agua de los océanos. Según su interpretación, las aguas se mueven hacia el oeste por la influencia de la luna, chocan contra la costa de América y son rechazadas hacia atrás, creando así el flujo y reflujo de las mareas. Escalígero no ignora la discrepancia entre el movimiento de las corrientes y las fases de la luna. Girolamo Cardano, a quien critica duramente, podría haberle ayudado, puesto que había resuelto esta dificultad explicando que no toda el agua sigue a la luna puesto que el movimiento se transmite de una parte a la siguiente. Pandolfo Sfondrato, en un folleto publicado en 1590, proponía una solución semejante, pero destacaba, como causa del flujo del agua hacia el oeste, el rol de la esfera celeste y no el de la luna. La conjetura de Bacon estaba sustancialmente de acuerdo con este punto de vista.[4]

4) Girolamo Borro, profesor en Pisa cuando Galileo era estudiante, invocaba el «calor templado» de la luna, como fuerza atractiva, por analogía con el fuego cuando hace que el agua se eleve al aproximarse al punto de ebullición. Bernardo Telesio sugería una relación bastante más vaga entre el sol, la luna y las mareas. Suponía que el mar se elevaba y tendía a hervir bajo el calor del sol, y que esto lo ponía en movimiento para evitar la evaporación, lo que determinaba el flujo y reflujo de las mareas.[5]

5) El médico Andrea Cesalpino, otro profesor de Pisa en los días de Galileo, sugería que la libración de la tierra ocasionaba las mareas. Esta interesante idea, nueva por lo que sé, está muy vinculada con su astronomía. Para evitar la necesidad de una novena y una décima esferas –para explicar, la primera, la precesión de los equinoccios, y la última, el fenómeno imaginario de su trepidación– adjudicaba a la tierra misma el movimiento que determina el fenómeno. Explicaba la trepidación suponiendo que la tierra poseía un movimiento libratorio irregular que determinaba las mareas.[6] R. L. Ellis, el editor de las *Obras* de Francis

3. Aristóteles, *Meteorologica*, libro 2, cap. 1.

4. La opinión de Escalígero fue estudiada por Francesco Patrizzi, *Nova de universis philosophia* (Venecia, 1593), p. 139*r*; Girolamo Cardano, *De subtilitate libre XXI* (Basilea, 1560), p. 96; Pandolfo Sfondrato, *Causa aestus maris* (Ferrara, 1590), pp. 7*v*-8*v*; Bacon, *Works*, vol. 3, p. 55.

5. Girolamo Borro, *Del flusso e reflusso del mare e dell'inondatione del Nilo* (Florencia, 1577); Bernardo Telesio, *De rerum natura* (Génova, 1588), libro 1, cap. 12, col. 572-573.

6. Andrea Cesalpino, *Questionum peripateticorum libri V* (Venecia, 1593), pp. 70*r*-71*v*. Diversas teorías sobre las mareas habían sido enumeradas por Otto Casmann, *Marinarum questionum tractatio philosophica* (Frankfurt, 1596), p. 173 y sig., quien utiliza extensamente el resumen de Patrizzi, *Nova de universis philosophia*, p. 137*v* y sig. Patrizzi no menciona a Cesalpino.

Bacon, ha sugerido la natural continuidad de la teoría de Cesalpino y la de Galileo.[7] Es lógico que este último pensara en Copérnico en relación con cualquier hipótesis acerca del movimiento de la tierra. Y no era el único, en realidad: Otto Casmann también estudiaba el movimiento de la tierra a partir de un esbozo de la teoría de Cesalpino, en su *Marinarumm questionum tractatio philosophica* de 1596.[8]

6) La contribución de Paolo Sarpi es más discutible. Su cuaderno de anotaciones incluye tres párrafos donde explica las mareas por el movimiento de la tierra. Las notas son de 1595 o 1596, cuando Sarpi pensaba, quizás, en escribir un tratado sobre las mareas que posteriormente completó, pero que se ha perdido.[9] Stillman Drake ha sugerido que reflejan una conversación entre Sarpi y Galileo.[10] Verdaderamente, es posible; pero no tenemos pruebas de que Galileo creyera en el sistema heliocéntrico antes de sus cartas de 1597 a Kepler y Mazzoni. Es interesante observar que, cuando Galileo informó a Kepler de que había logrado explicar muchos efectos naturales con ayuda de la teoría copernicana, inexplicables según las hipótesis opuestas, Kepler pensó de inmediato que Galileo intentaba explicar las mareas por el movimiento de la tierra, idea que se le ocurrió al mismo tiempo a su amigo Hans Geörg Herwart von Hohenburg.[11]

EL DISCURSO DE 1616

Galileo se refirió inicialmente al *Diálogo acerca de los dos sistemas máximos del mundo* como el *Sistema del mundo*. Después de 1616 lo

---

7. Robert Leslie Ellis, «Preface to the *De fluxu et refluxu maris*», en Bacon, *Works*, vol. 3, p. 44.

8. Otto Casmann, *Marinarum questionum tractatio*, pp. 200-216. Casmann sigue a Giovanni Costeo, *Disquisitionum physiologicarum* (Bolonia, 1598), pp. 90-100, en su respuesta a las objeciones contra Copérnico.

9. Paolo Sarpi, *Scritti filosofici et teologici*, ed. Romano Amerio (ed. Laterza, Bari, 1951), p. 115. En su vida de Sarpi, Fra Fulgenzio Micanzio deplora «el extravío de lo que escribió el Padre acerca del movimiento del agua, porque estoy convencido de que habría dado alimento a muchos intelectos que sufren hambre sin esperanza de hallar nada que al menos les parezca satisfactorio». Fulgenzio Micanzio, *Vita del Padre Paolo dell'Ordine de Servi* (Leiden, 1646), pp. 105-106.

10. Stillman Drake, «Galileo Gleanings X. Origin and Fate of Galileo's Theory of the Tides», *Physis*, nº 3 (1961), pp. 188-189.

11. Carta de Galileo a Kepler, 4 de agosto de 1597, *Opere di Galileo*, vol. X, p. 68; carta de Kepler a Hans Geörg Herwart von Hohenburg, 26 de marzo de 1598, *ibid.*, p. 72. Herwart von Hohenburg expresó su sorpresa de que nadie hubiese usado las mareas como un argumento en favor del movimiento de la tierra (carta a Kepler, 12 de marzo de 1598, en Johann Kepler, *Gesammelte Werke*, ed. F. Hammer *et al.*, 18 vols. hasta la fecha, ed. C. H. Beck, Munich, 1938-), vol. XIII, p. 178. Es digno de mención que Galileo y Herwart buscaran una prueba *física* del movimiento de la tierra.

llamó *Diálogo sobre las mareas* y de bastante mala gana se inclinó por fin ante los censores y abandonó este título, en 1632.[12] Había motivado el cambio de *Sistema del mundo* a *Diálogo sobre las mareas* la revelación, en 1615, de su nueva prueba física del movimiento de la tierra. El lector recordará que Galileo había viajado a Roma en el invierno de 1615 para salvar a Copérnico de la amenaza de la censura. Había fracasado en su intento, pero su sorprendente habilidad dialéctica había causado gran impresión en los intelectuales, asi como en los prelados. A pedido del joven cardenal Alessandro Orsini, escribió lo que consideraba su demostración más acabada del movimiento de la tierra: el argumento de las mareas. Aunque el *Discurso de 1616* no se publicó antes de su revisión e incorporación a la Cuarta Jornada del *Diálogo*, circuló ampliamente y sus copias llegaron a Venecia y a Viena en 1618. Richard White le mostró una copia a Francis Bacon a fines de 1619; éste, en su *New Atlantis*, publicado el año siguiente, rechazó vivamente la teoría de Galileo como contraria a las comprobaciones observadas.[13]

El *Discurso de 1616*, fechado el 6 de enero, procura resumir los argumentos expuestos una semana antes por Galileo en un debate privado con los amigos y conocidos del cardenal Orsini.

Al introducir el tema, Galileo parece inclinarse ante la experiencia:

> Cuando razonamos sobre la base de la experiencia sensorial (digna guía de confianza hacia el verdadero filosofar), vemos que el movimiento puede ser impartido al agua de varias maneras. Las examinaremos individualmente para ver si se puede considerar razonablemente a una de ellas la causa primaria del flujo y el reflujo del mar.[14]

Sin embargo, Galileo no menciona ninguna información recogida en Pisa o en Venecia, dos puertos donde pasó más de treinta años. Su primera pregunta no es «¿qué sabemos sobre el movimiento real del mar?», sino «¿cómo se puede impartir movimiento al agua en un recipiente?» Supone que la respuesta a esta pregunta tornará evidente la causa principal de las mareas. Bacon iniciaba su trabajo con un resumen de datos

---

12. «No he logrado obtener permiso para mencionar las mareas en el título del libro, aunque son ellas el principal argumento que considero en él» (carta a Elia Diodati, 16 de agosto de 1631), *Opere di Galileo*, Vol. XIV, p. 289. La idea de un Diálogo sobre las mareas no era nueva. Galileo puede haberla recibido de la obra de Ambrosio Florido, *Dialogismus de natura universa Maris, ac eius genesi, et de causa fluxus, et refluxus eiusdem, atque de alijs accidentibus, quae eius naturam comitantur. Interlocutores Philonauticus et Philosophus* (Pavía, 1613). Galileo no menciona la obra, pero sería extraño que no hubiese oído hablar de ella, porque su amigo Luca Valerio mantenía estrecha relación con la familia Aldobrandini y el mismo Galileo tenía correspondencia con el cardenal Ippolito Aldobrandini, a quien dedica el libro.

13. Bacon, *Works*, vol. 1, p. 327.

14. Galileo, *Discorso del flusso e reflusso del mare*, *Opere di Galileo*, Vol. V, p. 378. A partir de aquí, citado como *Discurso de 1616*.

observados; Galileo comienza con un homenaje a la «experiencia sensorial», pero, en ausencia de pruebas detalladas, esto no es más que un gesto verbal.

De las muchas maneras en que se puede hacer fluir el agua, Galileo considera particularmente sugestivo el movimiento de un lado a otro del agua en el fondo de un bote alternativamente impulsado y detenido. Compara con las mareas la acumulación del agua primero a proa y luego a popa. Sin embargo, la analogía no es totalmente satisfactoria, porque todo el bote comparte uniformemente la aceleración o el retardo, en tanto que el flujo y reflujo de la marea no son uniformes en toda la cuenca marina en que ocurren. Galileo elude esta crítica por medio de un modelo sofisticado que era familiar para los matemáticos y astrónomos contemporáneos. Pide a sus lectores que imaginen que la eclíptica y el ecuador coinciden. Se puede considerar que un punto de la superficie terrestre se mueve en un epiciclo unido a un deferente que representa la órbita de la tierra, como en la figura 21.

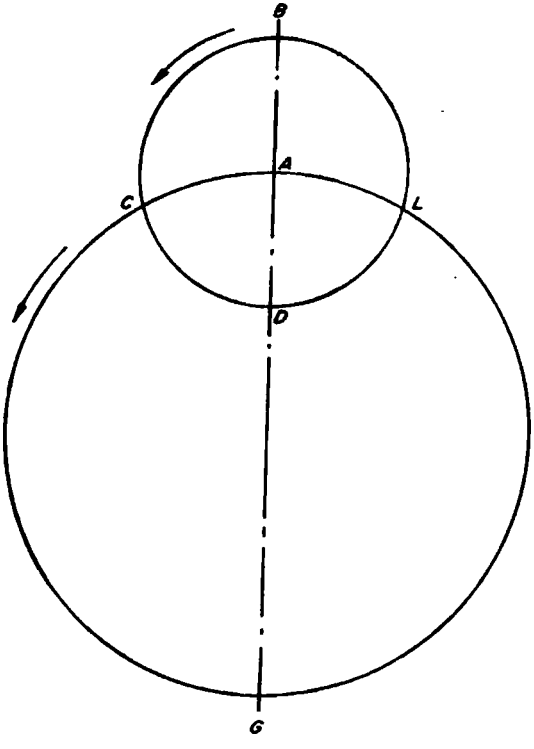


FIGURA 21

El epiciclo describe una revolución diaria. Durante medio día, la velocidad de ese punto es mayor que la del centro del epiciclo (el centro de la tierra); durante el otro medio día, la velocidad es menor. Las velocidades máximas y mínimas ocurren cuando un punto dado está en la misma línea que el centro del epiciclo y el del deferente. Como señala Ernst Mach en *The Science of Mechanics*, la teoría del movimiento epicíclico es errónea: Galileo confunde dos marcos de referencia diferentes.[15] Mientras se considera relativo al sol el movimiento de la tierra, se considera relativo a la tierra el movimiento del agua. Como está relacionada con la tierra, el agua no puede recibir una aceleración debida al movimiento anual de la tierra, y por tanto el agua debe estar en reposo en relación con la tierra. Esta crítica no técnica de la explicación de Galileo estaba perfectamente al alcance de la física preinercial y, en efecto, ya en 1633 la formuló un grupo de físicos franceses, entre ellos Jean-Jacques Bouchard, que escribió a Galileo:

> Varios miembros han llamado la atención acerca del problema suscitado por tu propuesta de que ocasione las mareas el movimiento desigual de distintas partes de la tierra. Admiten que esas partes se mueven a mayor velocidad cuando descienden en la dirección del movimiento anual que cuando van en la dirección opuesta. Pero esa aceleración sólo está relacionada con el movimiento anual; las partes relacionadas con el cuerpo de la tierra tanto como con el agua, siempre se mueven a la misma velocidad. Por lo tanto, dicen que es difícil comprender cómo las partes de la tierra que siempre se mueven de la misma manera relativamente a sí mismas y al agua, pueden imprimir movimientos variables al agua. Me han encomendado que intente obtener de ti alguna solución a su problema.[16]

En otras palabras, la aceleración centrípeta procedente de la rotación terrestre es constante en todas partes y no puede tener efectos sobre las mareas. Esto se explica porque Galileo no podía distinguir la aceleración centrípeta de la lineal; pero su modelo involucraba una consecuencia directamente observable que desdeñó sin excusa posible. Las velocidades axial y orbital de la tierra se combinan de tal modo que un punto en la superficie de la tierra se mueve muy rápido una vez por día cuando ambas revoluciones van en la misma dirección (el punto *B* en el diagrama) y muy lentamente en otro momento, cuando van en direcciones

---

15. Ernst Mach, *The Science of Mechanics*, trad. de Thomas J. McCormac, 6ª ed. (ed. Open Court Classics, La Salle, 1960), pp. 262-264.

16. Carta a Galileo, 5 de septiembre de 1633, *Opere di Galileo*, Vol. XIV, pp. 251-252. Infortunadamente, no sabemos si Galileo respondió a esta pregunta. Arthur Koestler observa que Galileo, inconscientemente, contrabandea por la puerta trasera el paralaje ausente cuando relaciona el movimiento del agua con el eje terrestre, pero el movimiento de la tierra con las estrellas fijas. «Las mareas se convirtieron en un *ersatz* del paralaje» (Arthur Koestler, *The Sleepwalkers* [ed. Hutchinson, Londres, 1959], p. 466).

opuestas (el punto *D*). La consecuencia inmediata es que la marea alta debería producirse a mediodía, el momento de mayor retardo, y la marea baja a medianoche, el momento de mayor aceleración. Galileo ni siquiera mencionó esta consecuencia obvia de su teoría. Esperaba que el modelo fuera atacado por un motivo diferente: cuando el océano es bastante grande, un extremo se moverá más rápido que el otro, en tanto que en un bote cuya velocidad varía, la aceleración o el retardo no son mayores en un extremo que en el otro. Su respuesta era que su modelo matemático explicaba la diferencia. Por ejemplo, si, en la figura 21 el océano tenía la longitud *BC*, el agua próxima a *B* se movería más rápido que la próxima a *C*.[17]

El reemplazo de modelos físicos por matemáticos plantea el problema de la verificación empírica. Galileo reconoce que es «muy difícil, si no imposible, duplicar su efecto con ningún experimento práctico»,[18] pero promete para un momento posterior la construcción de un modelo mecánico:

> Y aunque a muchas personas les parecerá quizá imposible que podamos experimentar los efectos de estos acontecimientos empleando máquinas y recipientes artificiales, esto no es del todo imposible. Poseo un modelo mecánico que revelaré en el momento adecuado, en el cual se puede observar en detalle el efecto de esta maravillosa composición de movimientos.[19]

Estas dos últimas citas reaparecen dieciocho años más tarde en el *Diálogo*, con alteraciones pequeñas pero significativas. Galileo reescribió el primer pasaje, que ya no dice «es muy difícil, si no imposible», sino simplemente «es imposible», y borró las palabras «que revelaré en el momento adecuado» del segundo pasaje.[20] Sin embargo, seguía afirmando que tenía esa máquina. Pero si la había construido, o planeaba construirla, ¿por qué no se lo dijo a Cesare Marsili cuando éste le informó por escrito que un ingeniero había construido un modelo para las mareas? Galileo sólo respondió que el modelo del ingeniero se limitaba a indicar variaciones de temperatura, y que él mismo había descubierto eso veinte años antes.[21] Guardaba silencio acerca de sus propios esfuer-

---

17. Galileo, *Discurso de 1616*, *Opere di Galileo*, Vol. V, p. 386. Esto no impide a Galileo poner en boca de Salviati en la Cuarta Jornada del *Diálogo*: «Ahora bien, señores: lo que hace el bote con respecto al agua que contiene, y lo que hace el agua con respecto al bote que la contiene, es *precisamente lo mismo* que hace la cuenca del Mediterráneo con el agua que contiene» (*ibid.*, vol. VII, cursivas del autor).

18. *Ibid.*, p. 385.

19. *Ibid.*, pp. 456-457.

20. Galileo, *Dialogo*, *ibid.*, Vol. VII, p. 456.

21. Carta de Cesare Marsili a Galileo, 3 de abril de 1626, *ibid.*, Vol. XIII, pp. 316-317; carta de Galileo a Cesare Marsili, 25 de abril de 1625, *ibid.*, p. 320.

zos para obtener un modelo. Conociendo la tendencia de Galileo a reclamar la prioridad por todos sus descubrimientos, este silencio es más elocuente que su confesión explícita de que apenas tenía una vaga idea de ese modelo mecánico. Estaba convencido de que un modelo matemático era, *en principio*, aplicable a la realidad física y esto era suficiente a sus ojos para justificar su afirmación de que había logrado lo que se proponía. Para Galileo, descubrir un modelo geométrico era un acto creativo; construirlo, un mero fastidio.

Después de demostrar a su satisfacción que el problema de las mareas se podía resolver, puesto que admitía el tratamiento matemático, Galileo trató de explicar las discrepancias que parecían debilitar su razonamiento. La más grave era que las mareas altas y bajas se suceden cada seis horas, y no cada doce como su teoría implica. Sin embargo, Galileo no pensaba que ésta fuera una acusación importante puesto que era, en sí, un mero dato de observación que no se apoyaba en un modelo geométrico. No se podía aducir una experiencia sin interpretar (sin geometrizar) como prueba contra una interpretación matemática coherente de la red de leyes que originan los datos observables. Galileo está dispuesto, a lo sumo, a conceder que el período de seis horas se observa en el Mediterráneo; mantiene que en el Atlántico es de doce horas, como se «observa todos los días en Lisboa». Galileo está tan convencido de la verdad de su teoría que dice: «La creencia de que los periodos de las mareas eran de seis en seis horas es una falacia que ha llevado a los autores a imaginar muchas inútiles fantasías».[22] En el *Diálogo*, Galileo abandona la errónea noción de que las mareas tienen un período de doce horas en el Atlántico, y solamente afirma que los períodos son conspicuamente menores de seis horas en el mar Egeo y en el Helesponto. Por lo tanto, en 1630 Galileo ha comprendido que no existen pruebas de un período mayor que el observado normalmente en el Mediterráneo. A pesar de ello, no modificó su teoría general, sino que la mantuvo por la pureza de su estructura geométrica.

LA CUARTA JORNADA DEL «DIÁLOGO»

El *Discurso de 1616* se convirtió en el núcleo de la Cuarta Jornada del *Diálogo acerca de los dos sistemas máximos del mundo*. Para el lector moderno, es un apéndice desconcertante de un tratado brillante, porque el autor estaba en el momento culminante de su tarea. La prueba de las mareas se tornó cada vez más importante para Galileo a medida que pasaban los años, y terminó por parecerle la única concluyente. Al final de la Cuarta Jornada, Galileo resume los tres argumentos básicos

22. Galileo, *Discurso de 1616*, *ibid.*, Vol. V, pp. 388-389.

en favor del copernicanismo, y expresa la esperanza de obtener pronto un cuarto y un quinto. El primero de ellos se refiere al estacionamiento y el movimiento retrógrado de los planetas, el segundo a la revolución solar y el tercero a las mareas. Los otros eran el desplazamiento paraláctico de las estrellas distantes y el cambio de posición del meridiano trazado en el pavimento de la iglesia de Sant'Onofrio de Bolonia, de los que no había pruebas. Como los primeros dos argumentos eran compatibles con el sistema planetario de Tycho Brahe, sólo quedaba como prueba decisiva del movimiento terrestre el argumento de las mareas.

> Si el globo terrestre estuviera inmóvil, el flujo y reflujo de los océanos no podría ocurrir naturalmente... si atribuimos al globo los movimientos que se le acaban de asignar, los mares deben estar necesariamente sometidos a un flujo y reflujo que en todo concuerda con lo que en ellos se observa.

Salviati admite al comienzo de la Cuarta Jornada que sólo ha observado lo que ocurre en el Adriático y en las costas del Tirreno, y que gran parte de su información descansa en informes ajenos, «que, por no estar muchas veces de acuerdo y por ser asi bastante poco dignos de confianza, más pueden contribuir a confundir que a confirmar nuestras especulaciones». Esperaríamos, a partir de esta confesión, que la teoria expuesta a continuación fuera en cierta medida hipotética. Pero esto sería no comprender bien a Galileo: su teoría no era el resultado de la observación, sino del estudio de las implicaciones matemáticas del movimiento terrestre. Y por lo tanto no debería sorprendernos que diga: «Por los datos de que estamos seguros, que cubren los principales acontecimientos, parece posible llegar a las causas primarias y verdaderas».

¿Cuáles son esos acontecimientos principales? ¿Son los cuatro periodos mencionados por Bacon y reconocidos por la mayoría de los autores contemporáneos en la materia? No exactamente. Galileo enumera tres periodos: el diurno, cuyos «intervalos en el Mediterráneo son en su mayoría de seis horas», el mensual, que «parece originado por el movimiento de la luna», y el anual, que «parece depender del sol». Pero no expone las diferencias de las mareas durante la luna llena, la nueva o sus cuartos, y aunque dice que las mareas durante los solsticios tienen diferente dimensión que las equinocciales, sólo veintiocho páginas más adelante afirma –equivocadamente– que son mayores durante los solsticios. Y partiendo de tan escasa información, Salviati, el vocero de Galileo, no vacila en hacer la siguiente y osada generalización:

> Me parece que estos efectos verdaderos y ciertos, por sí solos, aunque no se observaran otros, probablemente persuadirían a cualquiera, si desea mantenerse dentro de los límites de la naturaleza, a conceder que la tierra se mueve.[23]

23. Galileo, *Dialogo, ibid.*, Vol. VII, pp. 443-445.

Simplicio recuerda a Salviati que ya se han propuesto varias hipotésis para explicar las mareas, entre ellas la teoría de Marcantonio de Dominis sobre la fuerza atractiva de la luna que actúa sobre el océano.[24] La objeción corriente a de Dominis era que la marea alta no se produce sólo una vez por día, cuando la luna está directamente sobre el mar, sino dos veces, y la segunda cuando la luna se encuentra debajo del horizonte. En otras palabras, esta teoría, como la hipotésis de Galileo, implicaba un ciclo de veinticuatro horas y era rechazada porque no se ajustaba a la experiencia. Por supuesto, Galileo no podía lanzar esta crítica contra de Dominis; lo atacaba porque no habia comprendido que el agua ascendía y descendía solamente en los extremos del Mediterráneo, y no en su centro. En verdad, no se podía reprochar a de Dominis que no hubiera advertido este fenómeno: sólo existía a consecuencia de la teoría de Galileo.

Una vez despejados los mares de teorías rivales, Galileo se hizo felizmente a la vela. En la primera parte de la Cuarta Jornada sigue el itinerario del *Discurso de 1616* hasta que llega al tema de los vientos alisios, que introduce planteando una objeción originada en su análisis de 1616. Si el movimiento de la tierra determinaba el movimiento del agua, debía producir un efecto aún mayor sobre el aire, y se debería sentir en todo momento un fuerte viento del este. Como señala Simplicio:

> La experiencia diaria nos informa que esto debería ocurrir, porque cuando cabalgamos a sólo ocho o diez millas por hora en el aire tranquilo, sentimos en nuestros rostros lo que parece un fuerte viento. ¿Qué produciría, entonces, una rápida carrera a ochocientas o mil millas por hora?[25]

Salviati responde que es más difícil mover el agua que el aire, pero que la primera conserva su ímpetu por un período más largo de tiempo; por ejemplo, las olas de un lago no se aquietan apenas muere el viento. Concuerda en que en las llanuras de la tierra se debería sentir una brisa constante, y menciona el caso de los vientos alisios, que soplan de este a oeste en el ecuador. Alega también que en el Mediterráneo lleva menos tiempo viajar hacia el oeste que hacia el este. Galileo pone en boca de Sagredo –que ha sido cónsul en Aleppo– las siguientes palabras:

> Llevando un registro y memoria de los días de llegada y partida de los barcos en los puertos de Alejandría, Alejandreta y Venecia, he encontrado, comparándolos para satisfacer mi curiosidad, que una y otra vez el retorno a Venecia (es decir, el viaje de levante a poniente por el Mediterráneo),

24. Marcantonio de Dominis, *Euripus, seu de fluxu et refluxu maris sententia* (Roma, 1624).
25. Galileo, *Dialogo, Opere di Galileo*, Vol. VII, pp. 462-463.

> se hace en un 25 por ciento de tiempo menos que en la dirección opuesta. Se ve así que los vientos del este son más fuertes que los del oeste.[26]

Antes de analizar el razonamiento de Galileo, tal vez convenga recordar que los vientos alisios se deben a otra causa. El calor solar, mayor en el ecuador que en un punto situado al norte, calienta el aire y crea un cinturón de baja presión en el ecuador. El aire frío del norte crea un cinturón de alta presión, y el viento sopla de las altas a las bajas presiones sobre la superficie de la tierra. Una partícula que se desplaza en el sentido de la latitud tiende a conservar su momentum angular inmutable alrededor del eje de la tierra, alterando su movimiento en el sentido de la longitud. En el cinturón de las altas presiones, la partícula de aire tiene menos momentum angular que una partícula en el ecuador; y como el momentum angular se conserva, la partícula que se mueve hacia el sur se desvía a la derecha y, para un observador situado en la superficie de la tierra, los vientos alisios parecen soplar del noreste. Cerca del ecuador se encuentra la zona de las mortales calmas ecuatoriales, y no la brisa firme y fuerte de los vientos alisios. Galileo sabía que alguno de sus contemporáneos habían descubierto esto, para sus males, pero prefería ignorar el hecho.[27] Igualmente desconcertantes son sus datos acerca del Mediterráneo porque, al este de Italia, los vientos que prevalecen son los del oeste, en todas las estaciones, y no el viento del este que Sagredo menciona.

Simplicio formula otra objeción que no había sido tratada en el *Discurso de 1616*, pero que era esencial puesto que Sfondrato, Escaligero y Bacon la habían mencionado de una u otra forma. Con el pensamiento de Salviati en la cabeza, sostiene que el constante movimiento del aire de este a oeste era igualmente explicable por el movimiento del cielo de este a oeste. Era una objeción seria dentro del sistema tradicional astronómico, que postulaba un nexo continuo entre las esferas interior y exterior del universo. A Galileo, que negaba la existencia misma de tales esferas, le parecía ridículo.

El siguiente pasaje de la Cuarta Jornada es una tentativa original para resolver las variaciones mensuales y anuales que el *Discurso de 1616* ignoraba. La hipótesis ampliamente difundida de que la luna ejerce una influencia causal sobre los mares recibe, inicialmente, un firme rechazo. Es una posibilidad que Galileo desmiente:

> No puedo obligarme a creer en causas como las luces, los calores templados, los predominios de cualidades ocultas y otras ociosas imaginaciones

26. *Ibid.*, p. 466.

27. Giovanfrancesco Buonamici que escribía desde Madrid el 1° de febrero de 1630, informó explícitamente a Galileo acerca de la existencia de las calmas ecuatoriales (*ibid.*, Vol. XIV, p. 75)

> parecidas. Tanto se puede afirmar que son causas reales o posibles de las mareas como lo contrario, es decir que las mareas son su causa; porque las hacen surgir en mentes mejor equipadas para la locuacidad y la ostentación que para la reflexión o la investigación sobre las obras más secretas de la naturaleza.[28]

Los presupuestos básicos de un filósofo o un hombre de ciencia no sólo se revelan en los esfuerzos conscientes que hace para justificar sus teorías, sino también en la forma en que trata las hipótesis rivales. Pocas teorías ha atacado Galileo con tal violencia. La hipótesis lunar le irrita; es la clave de un sistema rival de pensamiento que no tiene un lugar en su propio marco de referencia conceptual. La idea de gravitación o de atracción estaba incrustada en una filosofía que se preocupaba por demás de las simpatías, las antipatías, las fuerzas ocultas, las afinidades misteriosas. Galileo había escapado de este universo discursivo y estaba en rebelión abierta contra él. No quiere saber nada con el mundo de la magia; busca la lucidez en el mundo de las puras formas geométricas. Está convencido de que su modelo matemático lo mantendrá en el buen camino, y trata de explicar las variaciones mensuales de las mareas alternando la velocidad del deferente (la revolución orbital), y las anuales modificando la velocidad del epiciclo (revolución axial). No está dispuesto a apelar a causas externas:

> Conviene que resolvamos todo el problema según los principios básicos y las hipótesis ya establecidas, sin introducir ninguna novedad en la astronomía ni en el universo en favor de las mareas, sino demostrando que las causas de todos los diversos fenómenos percibidos en las mareas residen en cosas ya conocidas y aceptadas como verdaderas e indudables.[29]

Respetar el principio de economía implica encontrar la estructura geométrica oculta bajo el tumulto de los hechos. En ese caso, significaba comprender que, si la fuerza motora se mantenía idéntica, un cuerpo se movería más lentamente en un círculo grande que en uno menor. Galileo ilustraba este principio matemático con ayuda de dos modelos. Con el primero demostraba que un peso movible podía aumentar o disminuir las vibraciones de un eje movible horizontalmente, regulando así el período de un reloj de engranajes. Con el segundo podía observar que la frecuencia de un péndulo varía con su longitud, lo que sugería una ley análoga en el cielo, donde el período de revolución de los planetas exte-

---

28. Galileo, *Dialogo, ibid.*, Vol. VII, p. 470. Cardano había observado más de medio siglo antes que nadie podía, a la vez, comprender la experiencia diaria y negar la influencia de la luna y el sol sobre las mareas (Girolamo Cardano, *De rerum varietate* [Basilea, 1557], p. 697).

29. *Ibid.*, p. 474.

riores era mayor que el de los situados más cerca del sol. Si la luna, concluía,

> continuara siendo movida por la misma fuerza y fuera conducida poco a poco a círculos más pequeños, adquiriría una disposición a abreviar los tiempos de sus períodos, como un péndulo al cual, durante sus oscilaciones, acortáramos la cuerda de que pende.[30]

Sin embargo, Galileo, para explicar las variaciones mensuales de la velocidad orbital de la tierra, se apoyaba sobre todo en la analogía con un eje recto en que la tierra no estaba del todo al final, mientras la luna actuaba como un peso que se deslizaba a la izquierda o a la derecha del punto marcado por la tierra.[31]

Se presentan a la mente dos objeciones. En primer lugar, la luna gira en torno de la tierra; no se mueve hacia atrás y hacia adelante como hace un peso en una barra rígida. En un segundo lugar, si el movimiento de la tierra hubiese sido tan irregular, sin duda habría sido observado por los astrónomos. Sagredo sólo plantea la segunda objeción, y Salviati responde que no es posible dejar de advertir esa irregularidad si se examina de cerca el progreso del sol a través de los signos del zodíaco. Galileo traslada diestramente el debate de la tierra al cielo, pero al hacerlo, admite un hecho astronómico que claramente contradice su propia teoría:

> [la tierra] recorre los dos semicírculos de la ecliptica (divida por los puntos equinocciales) en tiempos muy distintos, consumiendo unos nueve días más en pasar por una mitad; diferencia que, como ves, es muy conspicua.[32]

Una irregularidad de nueve días, completamente inesperada según la hipótesis galileana de las variaciones mensuales, contradecía la explicación de la variación anual que da posteriormente, con la ayuda de su modelo geométrico. Esta vez, el epiciclo está inclinado con respecto al plano del deferente, para explicar la irregularidad, las adiciones y sustracciones que la rotación diurna hace sobre el movimiento anual (figura 22).

---

30. *Ibid.*, p. 474.

31. Harold L. Burstyn presenta este argumento como prueba de que Galileo señaló por vez primera que no es el centro de la tierra, sino el centro de la masa del sistema tierra-luna, el que describe la órbita terrestre alrededor del sol. Según Burstyn, Galileo «demuestra claramente con un argumento similar al de la caída de los cuerpos, que la luna y la tierra –en cierta relación dinámica– deben girar alrededor de un punto que llamamos el centro común de sus masas» (Harold L. Burstyn, «Galileo's Attempt to Prove that the Earth Moves», *Isis*, nº 53 [1962], p. 179). La interpretación de Burnstyn se puede criticar porque la analogía que presenta directamente Galileo no es el péndulo, sino el peso movible de un reloj. Ver A. J. Aiton, «On Galileo and the Earth-Moon System», *Isis*, nº 54 [1963], pp. 265-266.

32. Galileo, *Dialogo*, *Opere di Galileo*, Vol. VII, p. 481.

El complicado argumento de Galileo provocó la confusión de sus lectores más competentes, como Baliani.[33] Afortunadamente, se podía expresar en términos sencillos: la inclinación del eje de la tierra con respecto a su órbita involucraba la modificación del modelo original. El movimiento anual y el diario sólo estaban en la misma línea durante los solsticios, cuando su combinación producía la mayor aceleración y el mayor retardo. En los equinoccios, ambos movimientos alcanzaban el máximo ángulo de divergencia y, consiguientemente, el efecto de su combinación era menor. Infortunadamente para la teoría de Galileo, lo cierto es lo contrario: las mareas equinocciales son las mayores porque reciben el máximo efecto de la atracción gravitacional del sol. Francis Bacon lo sabía, y es una de las objecciones de G. B. Riccioli contra la teoría de Galileo.[34] Pero Galileo pensaba en la perfección total del ajuste, y no en las arrugas del traje:

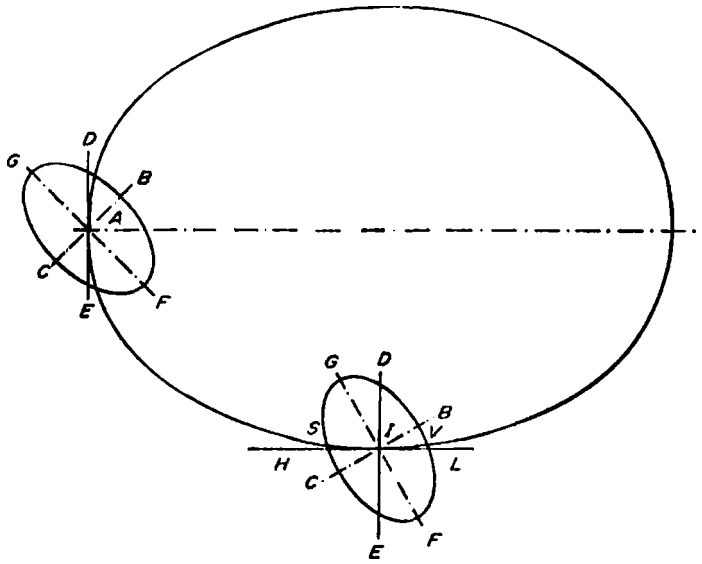


FIGURA 22

33. G. B. Baliani observaba que Galileo había explicado todo muy claramente «excepto en el análisis final de las irregularidades en las adiciones y sustracciones de las revoluciones anual y diurna» (carta a Galielo, 23 de abril de 1632, *ibid.*, Vol. XIV, p. 343). Tampoco Francesco Rinuccini advirtió por qué el movimiento diurno podía producir marcas mayores en los equinoccios (carta a Galileo, 23 de noviembre de 1637, *ibid.*, Vol. XVII, p. 227).

34. Bacon, *Works*, Vol. 3, p. 47; G. B. Riccioli, *Almagestum novum* (Bolonia, 1651), p. 380.

> Esto es todo lo que puedo decir sobre el asunto; quizás sea tanto como lo que comprende nuestro conocimiento; el que, como es bien sabido, sólo se refiere a las conclusiones fijas y constantes como los tres períodos de las mareas, en general, desde que dependen de causas invariables, unificadas y eternas.[35]

Posteriormente, lamenta la falta de visión de quienes o bien pensaban que un solo movimiento de la tierra era bastante,[36] o bien apelaban a un conflicto entre el movimiento de la tierra y el de la esfera lunar.[37] Finalmente, en nombre de la luz limpia y clara de la racionalidad, censura a Kepler por no haberse liberado de las cualidades ocultas y por aceptar el dominio de la luna. El debate concluye cuando Sagredo reconoce que no ha comprendido el argumento y expresa su esperanza de llegar a hacerlo, no cotejando sus consecuencias con la experiencia, sino pensando en él para superar la dificultad inicial de una proposición matemática nueva.

Es comprensible que el profesor aristotélico Antonio Rocco concluyera su análisis de la teoría galileana de las mareas dudando de su expresa confianza en la experiencia:

> Al comienzo de tu trabajo, solías proclamar que deseabas seguir de cerca el camino de lo sensible, y que el mismo Aristóteles (quien se comprometió a seguir este método y lo enseñó a otros) habría debido cambiar de opinión si hubiera visto lo que tú has observado. Sin embargo, a lo largo del libro te has mostrado tan ajeno a esta forma de proceder que... todas tus discutibles conclusiones están contra el conocimiento sensible, como cualquiera puede ver por sí mismo y como lo has dicho expresamente en la página 325 [*Opere di Galileo*, Vol. VII, p. 355] hablando de la teoría de Copérnico, que se tornó plausible y admirable para muchos por el razonamiento abstracto, aunque estaba en contra de toda experiencia sensorial.[38]

---

35. Galileo, *Dialogo*, *Opere di Galileo*, Vol. VII, p. 484.

36. *Ibid.*, p. 486. Galileo no da referencias en la Cuarta Jornada; pero en una carta a Cesare Marsili, el 20 de marzo de 1632, menciona a Cesalpino y a Origano (*ibid.*, Vol. XIV, pp. 334-335). Origano afirma que la tierra gira sobre su eje pero niega su revolución orbital en torno del sol (D. Origano, *Ephemerides* [Frankfurt, 1609], p. 2*v* de la Introducción).

37. En el margen, Galileo menciona al matemático griego Seleuco; y en una carta escrita poco antes de la publicación del *Diálogo*, comenta: «He recibido hace varios días los *Discursos* de Roffeni [esta obra se ha perdido]... He visto que el Signor Roffeni me honra al darme igual eminencia que el antiguo matemático Seleuco en cuanto al estudio de la causa de las mareas. Me alegra coincidir con la opinión de tan gran filósofo. Esto añadirá peso a la teoría. Sin embargo, yo había creído ser el primero que tuvo la idea; no de situar en el movimiento de la tierra la causa de tal efecto, sino de hacerlo de tal modo que el efecto pueda producirse. Es decir, no como han hecho Origano y Cesapino, como si no tuviera ninguna relación con ella, y como quizá también haya hecho el mismo Seleuco, aunque no sabemos cómo llegó a esa idea. Porque atribuir a la tierra un movimiento simple y uniforme no puede causar semejante cambio en el mar» (carta a Cesare Marsili, 20 de marzo de 1632, *ibid.*, Vol. XIV, pp. 334-335).

38. Antonio Rocco, *Esercitazioni filosofiche* (Venecia, 1633), *ibid.*, Vol. VII, p. 712.

Conclusión

La historia de la ciencia no se limita a la enumeración de las investigaciones que han tenido éxito; también debe referirse a las investigaciones fracasadas y explicar por qué algunos de los hombres más capaces no logran encontrar la llave del conocimiento. No hay duda de que la teoría de las mareas de Galileo no abrió ningún panorama científico a sus sucesores. Omitió tomar en consideración los cuatro períodos de las mareas, bien conocidos; saltó por encima de las discrepancias entre su teoría y la experiencia; no estudió alarmantes consecuencias que su explicación implicaba, e hizo a un lado desdeñosamente toda referencia a la influencia de la luna. Este último rechazo es más fácil de comprender si recordamos que las teorías sobre la atracción de la luna solían incluir cualidades ocultas que, para Galileo, eran el baldón de la filosofía. Pero, ¿por qué tanto desdén por los hechos? En el *Discurso de 1616*, sólo mencionaba el período diurno, pero distorsionaba el hecho al afirmar que, en el Atlántico, sólo había una marea alta y una baja cada veinticuatro horas. En el *Diálogo acerca de los dos sistemas máximos del mundo*, reconocía el ciclo diario correcto; pero negaba que el período semimensual dependiera de la luna, no relacionaba las mareas de los solsticios con la posición solar, y omitía el periodo mensual en cuya virtud las mareas se producen más tarde cada día, en relación con el tránsito de la luna. No atendió a tres consecuencias evidentes y fácilmente comprobables de su teoría. Primero, su explicación del movimiento diurno exigía que la marea alta se produjera a mediodía, el momento de mayor retardo, y la marea baja a medianoche, el momento de mayor aceleración. Segundo, la analogía del movimiento mensual con el peso movible en el eje regulador de un reloj implicaba que la velocidad orbital debía ser mayor durante la luna nueva que durante la luna llena y, por consiguiente, que las mareas debían ser mayores durante la luna nueva.[39] Finalmente, su explicación del período anual exigía mayores mareas en los solsticios que en los equinoccios. La experiencia contradecía abundantemente todas estas implicaciones.

El hecho de que Galileo defendiera su idea ante tantas dificultades, aparentemente sin la menor perturbación, puede considerarse como el testimonio de su fe en Copérnico. No hay duda de que se excedió en su deseo de crear un cosmos unificado que reemplazara el de Aristóteles. En su ansiedad por establecer una ciencia matemática capaz de unir el cielo y la tierra en una sola física, se lanzó hacia adelante sin contemplar

39. Sólo he encontrado un autor que afirme que las mareas son distintas en la luna nueva y la luna llena. Es Cesalpino: creía que las mareas eran mayores durante la luna llena, lo contrario de lo que establecía la teoría de Galileo (Andrea Cesalpino, *Questionum peripateticorum*, p. 70r).

los obstáculos. La nueva cosmología debía tener consecuencias observables en la tierra; y como Galileo había demostrado en las tres primeras jornadas del *Diálogo* que no se podían encontrar dichas consecuencias en el movimiento de los proyectiles ni en parte alguna de la tierra, estaba decidido a encontrarlas en el mar. Exhibía una desdeñosa impaciencia ante la complejidad de los datos, una especie de indignación como la que caracteriza a las mentes que enfocan la naturaleza decididas a encontrar orden y sencillez. Su instinto para la elegancia teórica le decía que Copérnico estaba en lo cierto; y aunque las observaciones reales sólo parcialmente lo apoyaban, estaba convencido de que eran sus adversarios quienes debían asumir el peso de las pruebas. Para refutarlo, no debían producir más y mejores experimentos, sino una alternativa más simple y geométricamente más satisfactoria. No tiene sentido el estudio de las mareas de Galileo si olvidamos que él era algo más que un físico. Era un filósofo de la naturaleza que miraba más allá del problema de la determinación del período de las mareas –que no le importaba demasiado– hacia un gran panorama de la ciencia donde lo real fuera descrito por lo ideal, lo físico por lo matemático, la materia por la mente. No dudaba de que su modelo de epiciclos y deferentes y de que sus comparaciones con el péndulo y con el peso regulador de un reloj le permitían comprender y expresar la estructura unificadora de la realidad. El isocronismo del péndulo era la clave del movimiento de los cuerpos en la tierra y en el cielo. Es perfectamente natural que lo considerara útil para explicar las propiedades principales del movimiento oceánico. El supuesto básico, aunque implícito, era que existía una correspondencia perfecta entre la mente humana y la realidad, en virtud de las matemáticas. Ésta es la raíz escondida de una gran parte de la ciencia natural renacentista. Galileo despreciaba a las personas que reiteraban «como trompetas» todo lo antiguo, pero adhería dogmáticamente a la idea de que el mundo estaba escrito con símbolos matemáticos. Sólo habría sacrificado su teoría si hubiese encontrado otra más comprensiva o más elegante en términos matemáticos. Es una ironía de la historia que esto haya ocurrido en 1637, cuando abandonó su teoría de las mareas por otra explicación igualmente equivocada. En noviembre de ese año, informó a Fra Fulgenzio Micanzio que había descubierto que la luna mueve su rostro de tres modos:

> es decir, primero a la derecha y luego a la izquierda, lentamente; después sube y baja; finalmente se inclina hacia el hombro derecho y más tarde hacia el izquierdo. Se pueden ver en el rostro de la luna todas estas variaciones, y lo que digo es obvio y manifiesto para los sentidos a causa de las grandes y antiguas manchas que hay en la superficie lunar. Y observa, además, una segunda maravilla: estas tres variaciones diferentes muestran tres períodos diferentes. La primera cambia de día en día, de modo que posee un período diurno; la segunda de mes en mes y tiene un período

> mensual, y la tercera completa su ciclo con un período anual. Ahora bien, ¿qué dirá su Reverencia si compara estos tres períodos lunares con los tres movimientos del mar –el diurno, el mensual y el anual– de los cuales, por consenso unánime, la luna es árbitro y superintendente?[40]

¿Acaso el hombre que compadecía a Kepler proque prestaba atención a «puerilidades» como el dominio de la luna sobre las aguas había capitulado ante las abrumadoras pruebas de la observación? En lo más mínimo, porque el paralaje diurno de la luna y sus libraciones en longitud y latitud no tienen la menor relación con los períodos de las mareas. Sin embargo, desde el punto de vista de las matemáticas, la correlación hipotética de esos movimientos con los períodos de las mareas tenía todas las ventajas de la simplicidad y la elegancia. Sólo por esta razón Galileo estaba dispuesto a descartar su modelo original de epiciclos y deferentes.

La desventurada teoría de las mareas es el secreto familiar (el *skeleton in the cupboard*) de la revolución científica. Cuando se exhibe a la luz, sirve para recordar que la ciencia de Galileo no era tanto un juego experimental como una apuesta platónica. En este sentido, merece su fama.

---

40. Carta a F. Micanzio, 7 de noviembre de 1637, *Opere di Galileo*, Vol. XVII, pp. 214-215.

BIBLIOGRAFÍA SELECTA

La literatura secundaria acerca de Galileo es muy vasta y esta bibliografía no pretende ser completa. Su finalidad es meramente indicar las obras que se han encontrado más útiles para escribir este libro.

I. Obras de Galileo

La edición standard es:

Galileo Galilei, *Le opere*, editada por Antonio Favaro, 20 vols. ed. G. Barbèra, Florencia, 1899-1909. Reimpresa en 1929-1939, 1964-1966, y en 1968.

Hay una excelente edición de los *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* anotada por A. Carugo y L. Geymonat. Ed. Paolo Boringhieri, Turín, 1968.

Traducciones al castellano

Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias, editada por Carlos Solís y Javier Sádaba, Editora Nacional, Madrid, 1976.

Diálogo sobre los sistemas máximos, editado por José Manuel Revuelta, ed. Aguilar, Buenos Aires, 1975.

Diálogo acerca de dos nuevas ciencias, trad. de José San Román Villasante, con notas del Dr. Teófilo Isnardi, ed. Losada, Buenos Aires, 1945.

El ensayador, editado por José Manuel Revuelta, ed. Aguilar, Buenos Aires, 1981.

El mensajero de los astros, editado por Jorge Fernández Chiti, ed. EUDEBA, Buenos Aires, 1964.

Traducciones al inglés

The Assayer, trad. de Stillman Drake en Galileo Galilei *et al.*

The Controversy on the Comets of 1618, ed. University of Pennylvania Press, Philadelphia, 1960.

Dialogue Concerning the Two Chief World Systems - Ptolemaic and Copernican, trad. de Stillman Drake, ed. University of California Press, Berkeley y Los Angeles, 1962.

Dialogue on the Great World Systems, trad. de Thomas Salusbury, revisado y anotado por Giorgio de Santillana, ed. University of Chicago Press, Chicago, 1953.

Dialogues Concerning two New Sciences, trad. de Henry Crew y Alfonso de Salvio, ed. Dover Publications, New York, 1953.

Discourse on the Comets, trad. de Stillman Drake en Galileo Galilei *et al.*, *The Controversy on the Comets of 1618*, ed. University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1960.

Letter to the Grand Duchess Christina, trad. de Stillman Drake en *Discoveries and Opinions of Galileo*, ed. Doubleday Anchor Books, Garden City, New York, 1957.

Letters on the Sunspots, trad. parcial de Stillman Drake, *ibid.*

The Little Balance, trad. de Laura Fermi y Gilberto Bernardini, *Galileo and the Scientific Revolution*, ed. Fawcet Publications, Greenwich, Connecticut, 1965.

On Motion y *On Mechanics*, trad. de I. E. Drabkin y Stillman Drake, ed. The University of Wisconsin Press, Madison, 1960.

II. Bibliografías

Favaro, Antonio y Carli, Alarico, *Bibliografia Galileiana* (1568-1895), ed. Fratelli Bencini, Roma, 1896.

Boffito, Giuseppe, *Bibliografia Galileiana* (1896-1940), ed. La Libreria dello Stato, Roma, 1943.

McMullin, Ernan, *Addenca to the Carli-Favaro (1564-1895) and Boffito (1896-1940) Bibliografia Galileiana* en *Galileo: Man of Science*, editada por Ernan McMullin, ed. Basic Books, New York, 1967, Apéndice B, pp. Lxx-Lxxxii.

—*Bibliografia Galileiana (1940-1964)* en *Galileo: Man of Science*, editado por Ernan McMullin, ed. Basic Books, New York, 1967, Apéndice A, pp. I-Lxix.

Cinti, Dino, *Biblioteca Galileiana raccolta dal Principe Giampolo Rocco di Torrepadula*, ed. Sansoni, Florencia, 1957.

Procissi, Angelo, *La Collezione Galileiana della Biblioteca Nazionale di Firenza*, ed. Ministerio della Publica Istruzione, Roma, 1959.

Cosenza, Mario Emilio, *Biographical and Bibliographical Dictionary of the Italian Humanists and the World of Classical Scholarship in Italy*, 5 vols., ed. G. K. Hall, Boston, 1962.

III. Fuentes primarias

Arquímedes, *The Works of Archimedes*, editado y parafraseado por T. H. Heath, 1897. Reimpreso por ed. Dover Publications, New York, 1953.

Aristóteles, *Meteorologica*, ed. y trad. de H. P. D. Lee, Loeb Classical Library, ed. Heinemann, Londres, 1962.

Aristóteles, *Minor Works*, ed. y trad. de W. S. Hett, Loeb Classical Library, ed. Heinemann, Londres, 1955.

Aristóteles, *On the Heavens*, ed. y trad. de W. K. C. Guthrie, Loeb Classical Library, ed. Heinemann, Londres, 1960.

Aristóteles, *Physics*, ed. y trad. de P. H. Wicksteed y F. M. Cornford, Loeb Classical Library, ed. Heinemann, Londres, 1960.

BENEDETTI, G. B, *Diversarum speculationum mathematicarum et physicorum liber*, Turín, 1585.

BORRO, Girolamo, *De motu gravitum et levium*, Florencia, 1575.

BORRO, Girolamo, *Del flusso e reflusso del mare, e dell'inondatione del Nilo*, Florencia, 1577.

BRAHE, Tycho, *Opere Omnia*, editado por I. L. E. Dreyer, 14 vols. e indice, Copenhague, 1913-1929.

BRUNO, Giordano, *Le cena de le Ceneri* (1584), editado por Giovanni Aquilecchia, ed. Einaudi, Turín, 1955.

BUONAMICO, Francesco, *De motu libri X*, Florencia, 1591.

CALCAGNINI, Celio, *Opere aliquot*, Basilea, 1544.

CAMPANELLA, Tommaso, *Apologia pro Galileo*, Frankfurt, 1622.

CARDANO, Girolamo, *De rerum varietate libri XVII*, Basilea, 1557.

CARDANO, Girolamo, *De Subtilitate libri XXI*, Basilea, 1560.

CASSMAN, Otto, *Marinarum questionum tractatio philosophica*, Frankfurt, 1596.

CESALPINO, Andrea, *Questionum peripateticorum libri V*, Venecia, 1593.

CHIARAMONTI, Scipione, *Antitycho*, Venecia, 1621.

CHIARAMONTI, Scipione, *Apologia Scipionis Claramontii pro Antitychone suo adversum Hyperaspistem Joannis Kepleri*, Venecia, 1626.

CHIARAMONTI, Scipione, *De tribus stellis, quae annis 1572, 1600, 1604 comparuere, libre tres*, Cesena, 1628.

CLAVIUS, Christoph, *Opera mathematica*, 5 vols., Mainz, 1611-1612.

COPERNICUS, Nicolaus, *De revolutionibus orbium caelestium*, Nuremberg, 1543.

COSTEO, Giovanni, *Disquisitionum physiologicarum... libri sex.*, Bolonia, 1589.

DE DOMINIS, Marcantonio, *Euripus, sive de fluxu et refluxu maris sententia*, Roma, 1624.

DESCARTES, René, *Oeuvres*, editadas por Charles Adam y Paul Tannery, 12 vols. e indice, 1897-1913. Reimpresas por ed. Vrin, París, 1956-1957.

DONI, Anton Francesco, *Mondi celesti, terrestri, et infernali de gli academici pellegrini*, Venecia, 1567.

FLORIDO, Ambrosio, *Dialogismus de natura universa maris, ac eius genesi et de causa fluxus et refluxus eiusdem atque de alijs accidentibus, quae eius naturam comitantur*, Pavía, 1613.

FERRARI, Antoni [Galateo], *Liber de situ elementorum*, Basel, 1558.

FOSCARINI, Paolo Antonio, *Lettera sopra l'opinione de'Pittagorici e del Copernico della mobilità della terra e stabilità del sole e del nuevo Pittagorico sistema del mondo*. Nápoles, 1615.

FRACASTORO, Girolamo, *Opera omnia*, Venecia, 1555.

GILBERT, William, *De magnete*, Londres, 1600.

HERO DE ALEXANDRIA, *Spiritualium liber*, ed. y trad. al latin por Federico Commandino, Urbino, 1575.

KEPLER, Johann, *Gesammelte Werke*, ed. por Max Caspar y Franz Hammer, 18 vols. hasta la fecha, ed. C. H. Beck, Munich, 1938– .

MAGINI, Giovanni Antonio, *Ephemerides coelestium motuum ab anno Domini 1581 usque ad annum 1620*, Venecia, 1582.

MALAPART, Charles, *Austriaca sidera heliocyclica astronomicis hypothesibus illigata*, Douay, 1633.

MAZZONI, Jacopo, *In universam Platonis et Aristotelis praeludia, sive de comparatione Platonis et Aristotelis*, Venecia, 1597.

MEDINA, Pietro da, *L'arte del navegar*, Venecia, 1554.
MERSENNE, Marin, *Harmonicarum libri XII*, Paris, 1636.
MERSENNE, Marin, *Harmonie universelle*, Paris, 1636. (Existen, por lo menos, dos ediciones parisinas del mismo año: una de Sébastien Gramoisy y otra de Pierre Ballard.)
MERSENNE, Marin, *Correspondence*, ed. por Cornelis de Waard, 10 vols., ed. Vrin, París, 1945-1967.
MICANZIO, Fulgencio, *Vita del Padre Paolo dell'Ordine de'Servi*, Leiden, 1646.
MONTE, Guidobaldo del, Mechanicorum liber, Pesaro, 1577.
ORIGANO, Davide, *Ephemerides*, Frankfurt, 1609.
PASCAL, Blaise, *Oeuvres complètes*, ed. por Jacques Chevalier, ed. Bibliotèque de la Pléiade, 1962.
PATRIZZI, Francesco, *Discussiones peripateticae*, Basel, 1581.
PATRIZZI, Francesco, *Nova de universis philosophia*, Venecia, 1593.
PTOLEMY, *Almagest*, trad. de R. Catesby Taliafero en *Great Books of the Western World*, n.º 16, ed. The University of Chicago Press, Chicago, 1952.
RICCIOLI, Giovanni Battista, *Almagestum novum*, Bolonia, 1651.
SARPI, Paolo, *Scritti teologici*, ed. por Romano Amerio, ed. Laterza, Bari, 1951.
SFONDRATO, Pandolfo, *Causa aestus maris*, Ferrara, 1590.
STEVIN, Simon, *Principal Works*, ed. por E. Crone, E. J. Dijksterthuis, R. J. Forbes, M. G. J. Minnaert, A. Pannekoek, 2 vols. en 3, ed. C. V. Swets and Zeitliner, Amsterdam, 1955-1958.
TARDE, Jean, *Borbonia Sidera, id est planetas qui solis limine circumvolitant motu proprio ab regulari, falso hactenus et helioscopis maculae solis nuncupati*, Paris, 1620.
PELESIO, Bernardo, *De rerum natura*, Génova, 1588.
TORRICELLI, Evangelista, *Opere geometrica*, Florencia, 1644.
VITRUVIUS, *De architectura*, ed. y trad. por F. Granger, Loeb Classical Library, ed. Heinemann, Londres, 1962.
WAGHENAER, Lucas Janz [Aurigarius], *Speculum nauticum*, Leiden, 1586.

IV. FUENTES SECUNDARIAS

AITON, E. J., «Galileo's Theory of the Tides», *Annals of Science*, n.º 10 (1954), pp. 44-57.
AITON, E. J., «On Galileo and the Earth-Moon System». *Isis*, n.º 54 (1963), pp. 265-266.
AITON, E. J., «Galileo and the Theory of the Tides», *Isis*, n.º 55 (1965), pp. 56-61.
ASHLEY MONTAGU, F. M., *Studies and Essays... Offered... to George Sarton*, 1946. Reimpreso por ed. Kraus Reprint, New York, 1969.
BARNARDINI, Gilbert y Fermi, Laura, *Galileo and the Scientific Revolution*, ed. Fawcet Publications, Greenwich, Connecticut, 1965.
BIAGI, Maria Luisa Altieri, *Galileo e la terminologia tecnicoscientifica*, ed. Leo S. Olschki Editore, Florencia, 1965.
BOAS, Marie, *The Scientific Renaissance 1450-1630*, ed. Collins, Londres, 1962.
BONELLI, Maria Luisa, «Un'esperienza di Vicenzio Viviani fatta dalla Torre di Pisa», *Physics*, n.º 1 (1959), pp. 41-44.

BULFERETTI, Luigi, *Galileo Galilei nella società del suo tempo*, ed. Lacaita Editore, Manduria, 1964.

BURSTYN, Harold, «Galileo's Attempt to Prove that the Earth Moves», *Isis*, n.º 53 (1962), pp. 161-165.

BURSTYN, Harold, «Galileo and the Earth-Moon System: Reply to Dr. Aiton», *Isis*, n.º 54 (1963), pp. 400-401.

BURSTYN, Harold, «The Deflecting Force of the Earth's Rotation from Galileo to Newton», *Annals of Science*, n.º 21 (1965), pp. 47-80.

BURTT, E. A., *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science*, 2.ª ed. rev., ed. Routledge and Kegan Paul, Londres, 1932.

CLAGETT, Marshall y MOODY, Ernest, *The Medieval Science of Weights*, ed. The University of Wisconsin Press, Madison, 1952.

CLAGETT, Marshall, *The Science of Mechanics in the Middles Ages*, ed. The University of Wisconsin Press, Madison, 1961.

CLAGETT, Marshall, *Archimedes in the Middle Ages*, n.º 1, The Arabo-Latin Tradition, ed. The University of Wisconsin Press, Madison, 1964.

CROMBIE, A. C., «Galileo's *Dialogues Concerning the Two Principal Systems of the World*», *Dominican Studies*, n.º 3 (1950), pp. 105-138.

CROMBIE, A. C., *Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science 1100-1700*, ed. Clarendom Press, Oxford, 1953.

CROMBIE, A. C., *Medieval and Early Modern Science*, 2.ª ed. rev., 2 vols., ed. Doubleday Anchor Books, Garden City, New York, 1959.

CURTIUS, E. R., *Europäische Literatur und lateinisches Mittelalter*, 2.ª ed. rev., ed. A. Francke Verlag, Berna, 1953.

DIJKSTERTHUIS, E. J., *Archimedes*, ed. Ejnar Munksgaard, Copenhague, 1956.

DIJKSTERTHUIS, E. J., *The Mechanization of the World Picture*, trad. de C. Dikshoorn, ed. The University Press, Oxford, 1961.

DRAKE, Stillman, «Free Fall in Galileo's *Dialogue*», *Isis*, n.º 57 (1966), pp. 269-271.

DRAKE, Stillman, *Galileo Studies*, ed. The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1970.

DREYER, J. L. E., *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, ed. rev. con un prólogo de W. H. Stahl, ed. Dover Publications, New York, 1953.

DUHEM, Pierre, *Les origines de la statique*, 2 vols., ed. Hermann, París, 1905-1906.

DUHEM, Pierre, *Le système du monde*, 10 vols., ed. Hermann, París, 1913-1959.

FAVARO, Antonio, *Galileo Galilei e lo Studio di Padova*, 2 vols., 1883. Reimpreso por ed. Antenore, Padua, 1966.

FAVARO, Antonio, *Galileo Galilei a Padova*, ed. Antenore, Padua, 1968.

FAVARO, Antonio, *Oppositore di Galileo. III. Cristoforo Scheiner*, ed. Carlo Ferrari, Venecia, 1919.

FIGUROWSKI, N. A. *et al.*, *Sowjetische Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaft*, ed. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft, Berlin, 1960.

GARIN, Eugenio, *La cultura filosofica del Rinascimento*, ed. Sansoni, Florencia, 1961.

GARIN, Eugenio, *Scienza e vita civile nel Rinascimento italiano*, ed. Universale Laterza, Bari, 1965.

GEYMONAT, Ludovico, *Galileo Galilei: a Biography and Inquiry into his Philo-*

sophy of Science, trad. de Stillman Drake, con notas adicionales y apéndice, ed. McGraw-Hill, New York, 1965.

GILBERT, Neal, «Galileo and the School of Padua», *Journal of the History of Philosophy*, n.º 1 (1963), pp. 223-231.

GILBERT, Neal, *Renaissance Concepts of Method*, ed. Columbia University Press, New York, 1960.

GOLDBECK, Ernst, «Galileis Atomistik und ihre Quellen», *Biblioteca Mathematica*, n.º 3 (1902), pp. 84-112.

GOLINO, Carlo, L., ed. *Galileo Reppraised*, ed. The University of California Press, Berkeley y Los Angeles, 1966.

HALL, A. Rupert, *From Galileo to Newton 1630-1720*, ed. Collins, Londres, 1964.

HALL, A. Rupert, «Galileo and the Science of Motion», *British Journal for the History of Science*, n.º 2 (1965), pp. 185-200.

JAMMER, Max, *Concepts of Force*, ed. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1957.

KAPLON, Morton, F., *Homage to Galileo*, ed. M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1965.

KOESTLER, Arthur, *The Sleepwalkers*, ed. Hutchison, Londres, 1959.

KOYRÉ, Alexandre, «Galileo and Plato», *Journal of the History of Ideas*, n.º 4 (1943), pp. 400-428.

KOYRÉ, Alexandre, *Etudes Galiléennes*, 1939. Reimpreso por ed. Hermann, París, 1966.

KOYRÉ, Alexandre, *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, ed. Hermann, París, 1966.

KUHN, Thomas, *The Copernican Revolution*, ed. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1957.

LINDBERG, Davis, «Galileo's Experiments on Falling Bodies», *Isis*, n.º 56 (1965), pp. 352-354.

LÖWENHEIM, «Der Einfluss Demokrit's auf Galilei», *Archiv für Geschichte der Philosophie*, n.º 7 (1894), pp. 230-268.

MAIER, Annaliese, *Die Vorläufer Galilei im 14. Jahrhundert*, ed. Edizioni di storia e litteratura, Roma, 1949.

MCMULLIN, Ernan, ed. *Galileo: Man of Science*, ed. Basic Books, New York, 1967.

MOODY, E. A., «Galileo and Avempace: the Dynamics of the Leaning Tower Experiment». *Journal of the History of Ideas*, n.º 12 (1951), pp. 163-193 y 375-422.

NICOLSON, Marjorie Hope, *The Breaking of the Circle*, ed. rev., ed. Columbia University Press, New York, 1960.

OLSCHKI, Leonardo, *Galileo und seine Zeit*, ed. Max Niemeger Verlag, Halle (Saale), 1927.

OLSCHKI, Leonardo, «Galileo's Philosophy of Science», *Philosophical Review*, n.º 52 (1943), pp. 349-365.

PANOFSKY, Erwin, «Galileo as a Critic of the Arts», *Isis*, n.º 47 (1956), pp. 3-15.

PLANCK, Max, *Scientific Autobiography and Other Papers*, ed. y trad. de F. Gaymor, ed. Williams and Norgate, Londres, 1960.

RANDALL, John Herman Jr., *The School of Padua and the Emergence of Modern Science*, ed. Antenore, Padua, 1961.

RONCHI, Vasco, *Il cannochiale di Galilei e la scienza del Seicento*. 2.ª ed. rev., ed. Einaudi, Turin, 1958.

ROSSI, Paolo, *Aspetti della rivoluzione scientifica*. ed. Morano Editore. Nápoles. 1971.

SCHMITT, Charles B., *Gianfrancesco Pico della Mirandola (1469-1533) and His Critique of Aristotle*. ed. Martinus Nijhoff, La Haya, 1967.

SCHMITT, Charles B., «Experimental evidence for and against a Void: the Sixteenth-Century Arguments», *Isis*, n.º 58 (1967), pp. 352-356.

SCHMITT, Charles B., «Experience and Experiment: A Comparison of Zabarella's Views with Galileo's in *De Motu*», *Studies in the Renaissance*, n.º 16 (1969), pp. 80-138.

SCHREIBER, Johann, «P. Christoph Scheiner S. J. und seine Sonnenbeobachtungen», *Natur und Offenbarung*, n.º 48 (1898), pp. 1-20, 78-93, 145-158 y 209-228.

SETTLE, Thomas B., «An Experiment in the History of Science», *Science*, n.º 133 (1961), pp. 19-23.

SETTLE, Thomas B., *Galilean Science. Essays in the Mechanics and Dynamics* of the *Discorsi*. MMS. Tesis presentada en la Faculty of the Graduate School de la Cornell University para el grado de Doctor en Filosofía, Junio 1966.

STRONG, Edward, *Procedure and Metaphysics*, 1936. Reeditado por ed. Georg Olms, Hildesheim, 1966.

Traducciones al castellano

GEYMONAT, Ludovico, *Galileo Galilei*, ed. Peninsula, Barcelona, 1969.

KOESTLER, Arthur, *Los sonámbulos*, ed. EUDEBA, Buenos Aires, 1963.

KOYRÉ, Alexandre, *Estudios galileanos*, ed. Siglo XXI, Madrid 1980.

KUHN, THOMAS S., *La revolución copernicana*, ed. Ariel, Barcelona, 1978.

ÍNDICE ALFABÉTICO

Academia Florentina, 17, 96
Academia Linceana, 67, 72, 67*n*
Académico (Galileo), 98, 113, 151, 152, 153, 154
Accademia del Dissegno, 17
Accademico Incognito, *ver* Elci, Arturo Pannochieschi dei Conti D'Elci
aceleración, 20, 21, 24, 20*n*-21*n*, 32-33*n*, 158, 159, 160, 165, 167, 184, 188-192, 195, 197-198, 203-205
Acquapendente, Fabrizio Girolamo, 55
acto, y potencia, 43, 170, 196
Agucchi, Giovanni Battista, 78, 88, 88*n*
Aiton, A. J., 211*n*
Aldobrandini, Card. Ippolito, 202*n*
Alejandro el Grande, 52
alquimistas, 148
Altieri Biagi, Maria Luisa, 32*n*
amigos literarios, 95, 96, 111, 130, 133
analogía, 49, 57, 58, 59, 60, 70, 83, 84, 85, 99, 145, 162, 194, 195, 199-203, 210-211, 214
Anaxágoras, 97
Anaximandro, 53*n*
antiguos, 52, 132
apariencias, «salvar las», 90, 102, 103, 174
Apelles, *ver* Scheiner, Christopher.
Apolonio, 199
Aquino, Tomás de, 129*n*
arco iris, 99, 110, 119
Ariosto, 164
Aristarco, 132, 133*n*, 177
Aristóteles, 20*n*, 21, 22, 23, 23*n*, 24, 25, 29, 32, 32*n*, 35, 41, 42, 47, 51, 52, 53, 54, 57, 63, 66, 79, 97, 98, 104, 110, 112, 115, 118, 129*n*, 132, 133, 134, 141, 142, 148, 156, 168, 169, 178, 180, 190, 191, 192, 194, 196, 197, 199, 213, 214; *De Anima*, 129*n*; *De Mechanica*, 34-35, 40, 41, 66; *Meteorologica*, 97, 134, 199; *De Coelo* (acerca del cielo), 23, 32*n*, 47, 133*n*, 152*n*; sobre los cometas, 97-99; objeción a Demócrito, 98; crítica a Aristóteles, 141-145; cosmología de, 132-154; sobre las mareas, 199
Arquímedes, 17, 18, 19, 23, 24, 25, 33, 33*n*, 35, 36, 40, 41, 43, 51, 53, 57, 62, 63, 66, 111; obras matemáticas de, 18*n*; método de, 17, 18, 34-42, 58, 198; principio de, 63
Arrighetti, Filippo, 31
arte, prejuicio clasisista de Galileo acerca del, 164*n*
astrología, 95, 148, 193
astronomía, griega, 132; interpretación de, 138, 187; pura y filosófica, 90-91, 175. *Ver también* Copérnico, Ptolomeo.
atomismo, 46-50, 125-130, 128*n*, 171*n*
atracción, 181; fuerza de, 58, 154, 200, 208; magnética, 58; de la luna, 214; del sol, 154, 212
Aurigarius (Lucas Waghenaer), 199*n*
aurora boreal, 100-101
autoridad, 50-53, 54, 66, 84, 130-131, 139-140, 148, 153, 188
Averroes, 127

Bacon, Francis, 199, 199*n*, 200, 200*n*, 201, 202, 207, 209, 212

balanza, hidrostática, 17-19. *Ver también* palanca.
Baliani, Giovanni Battista, 84*n*, 107-108, 104*n*, 106*n*, 108*n*, 117, 122, 184*n*, 188, 189, 199*n*, 212, 212*n*
Barberini, Maffeo (Urbano VIII), 31, 73, 96, 140
Biblia, citas de Galileo, 84*n*; la creación en la, 113; milagro de Josué, 139; la naturaleza y la, 150
Boas Hall, Marie, 132
Borro, Girolamo, 200
Borromeo, Card. Carolo, 71*n*
Bouchard, Jean-Jacques, 204
Brahe, Tycho, 72, 95, 98, 99, 101, 102, 104, 105, 107*n*, 108, 108*n*, 109, 109*n*, 110, 130, 132, 133, 134, 137, 156, 172, 175, 185, 186, 207
Brengger, J. G., 71*n*
Bruno, Giordano, 184*n*
Buonamici, Giovanfrancesco, 209*n*
Buridan, Jean, 198
Burstyn, Harold, L., 211*n*
Burtt, E. A., 150

caída de los cuerpos, 20, 20*n*, 21, 21*n*, 22, 24, 27, 158-159, 168-169, 184-185, 184*n*, 188-193, 190*n*, 195; desde el mástil de un barco, 157-158, 181, 184-185
calmas ecuatoriales, 209
calor, causa del, 30, 116-118, 122*n*, 125-126
Campanella, Tommaso, 84*n*
Carcavy, Pierre, 152, 160
Cardano, Girolamo, 200, 200*n*., 210*n*
Carugo, Adriano, 16*n*
Casmann, Otto, 201, 201*n*
Cassirer, Ernst, 54*n*
Castelli, Benedetto, 27, 31, 48, 53*n*, 54, 54*n*, 56*n*, 57, 57*n*, 81*n*, 126*n*
causa, básica, 65; de la caída de los cuerpos, 164; en los cuerpos flotantes, 32-33, 32*n*; del calor, 125; del magnetismo, 187; de los fenómenos naturales, 57; de las manchas solares, 67-68; de las mareas, 209-210; verdadera e inmutable, 63, 65, 213
Cavalieri, Bonaventura, 160
Ceronico, Leonardo, 71*n*
Cesalpino, Andrea, 200-201, 200*n*, 213*n*, 214*n*
Cesarini, Ferdinando, 27
Cesarini, Virginio, 111, 133, 133*n*
Cesi, Federico, 67, 67*n*, 72*n*, 86, 86*n*
Chiaramonti, Scipione, 107*n*, 110*n*, 171*n*, 172
Chiocco, Andrea, 71*n*
Christina, Gran Duquesa, 78*n*, 150
Ciampoli, Giovanni, 105*n*, 133, 133*n*
ciencia, y matemáticas, 23-24, 27, 77-78, 152, 215; la explicación en la, 65, 181, 196; galileana, 101-102, 178-179; clases, 54-66; naturaleza de la, 66, 90-91
circularidad, tema platónico de la, 112; principio de la, 102, 109; triunfo de la, 142. *Ver también* movimiento, circular.
Clagett, Marshall, 18*n*, 19*n*, 33*n*
Clavius, Christopher, 19, 71, 72, 72*n*, 137, 185
Coignet, Michel, 19, 33*n*
Colombo, Lodovico (delle Colombe), 30, 31, 43, 47, 48, 49, 50, 51*n*, 52, 53, 53*n*, 56, 64*n*, 65*n*, 137, 138, 139, 161, 183, 195
cometas, 76, 80-81, 95-131; como planetas, 97; como estrellas errantes, 97; movimiento, 101-104, 108; naturaleza, 97-100, 106, 118-121; posición, 99-100; tamaño, 100-101
compás, militar y geométrico, 27, 31*n*
confirmación de teorías, 73, 115, 116, 186-187, 205-206
Contarini, Giacomo, 26, 26*n*
Copérnico, Nicolás, 72, 80, 81*n*, 96, 102, 105, 107*n*, 108, 130, 132, 132*n*, 133, 134, 137, 140, 171*n*, 173, 174, 175, 176, 177, 179, 201, 213, 214, 215; desafío a, 95-96, 107-110, 107*n*; *De Revolutionibus*, 81, 132, 140, 176; sistema de,

155-198; «tercer movimiento», 173-174
Coresio, Giorgio, 20*n*, 31, 48, 48*n*, 50, 50*n*, 52, 52*n*, 53, 53*n*, 56, 57*n*, 58
Cosimo II, Gran Duque, 28, 31, 67*n*
Costeo, Giovanni, 201*n*
creación, 113
cualidades, del calor y del frío, 30; primarias y secundarias, 125, 128-129, 196-197
cuerpos flotantes, 29, 30-46
Curtius, E. R., 84*n*

Dante, 17, 18
dardo, 116, 160
Demócrito, 47, 53, 53*n*, 97, 127, 128*n*
demostración, la ciencia como, 25, 33, 40, 55, 73, 79, 80, 112-113, 130-131, 147-150, 159-160, 176-177, 190, 202-203
desplazamientos, virtuales, 24, 43*n*, 62
Digges, Thomas, 132*n*
Dijksterhuis, E. J., 18*n*, 43*n*, 197
dinámica, 24, 139, 189
Dini, Piero, 78*n*, 126, 140
Diodati, Elia, 202*n*
Dios, 91, 153, 156, 195-196; como un geómetra, 150
dominicano, 82
Dominis, Marcantonio de, 208
Doni, Anton Francesco, 125
Drake, Stillman, 15, 19, 20*n*, 29*n*, 31*n*, 88*n*, 174*n*, 201

Ecfanto, 133*n*
eclipses, 90; de Mercurio, 71; de la luna, 57*n*, 145; del sol, 71, 100; manchas solares que eclipsan al sol, 68
Edad Media, 51, 127, 193
Elci, Arturo Pannochieschi dei Conti D', 31, 48, 52, 55, 56, 58, 61
Ellis, Robert Leslie, 200
Epicuro, 128*n*
Escaligero, G. C., 200, 209
escolásticos, 52-55, 66, 113, 127, 128-129
esencia, de la gravedad, 164, 196; de las sustancias materiales, 91-94
Esquilo, 98
estrellas, disposición de las, 104, 110; y cometas, 97; y manchas solares, 69-70, 81-82, 89, 91; su distancia, 133-134; fuerza que las mueve, 164-165, 196; número y forma, 130; vistas desde una alta montaña, 136; tamaño, 18, 97, 100-101, 172, 185
Euclides, 23, 27, 51
Eudoxos, 132
experimento, y «experiencia», 78, 171; Aristóteles y el, 52; desde torres, 21-22; función del, 57-66, 179, 183-193; Grassi y el, 122-123; en hidrostática, 28, 26*n*, 37-41, 44, 46, 47; sobre la temperatura, 27-28; predicción del resultado, 46-47, 181, 187-188; experimentos mentales, 22, 25*n*, 84-86, 124, 184, 185-187

Fabricius, Johann, 70*n*
Favaro, Antonio, 31, 70*n*, 96
Fermat, Pierre, 160
Ferrari, Antonio (Galateo), 199
Filolao, 132*n*
filosofía, y matemáticas, 71, 90*n*, 114, 138, 153, 166-171, 178-179; aristotélica, 30, 43-44, 50-53, 93-94, 141-149, 168-171, 193-195; plaga de la, 197; presupuestos de la, 210; rompecabezas de la, 194
Florencia, 19, 28, 150, 186
Florido, Ambrosio, 202*n*
formas, y caída de los cuerpos, 191; y sensación, 121-129; excelencia de la, 112-113, 130, 164; de las manchas solares, 69, 84-85, 91, 93, 88*n*; rol en la flotación, 30-31, 43-46, 47, 64-65; esférica, 161
formas, aristotélicas, 43, 44, 56, 127,

194, 195; platónicas, 43-44, 112, 178-179, 198, 210
fotósfera, 88
Fracastoro, Girolamo, 132
fuego, prueba del atomismo, 46-50; exhalaciones igneas, 63; movimiento del, 142; partículas de, 122, 125-126
fuerza, 33, 34; actuante sobre los planetas, 153-154, 164, 196; y resistencia, 197, 198; atractiva, 58, 154, 200, 208; centrípeta, 162-163, 165-166; concepto de Copérnico acerca de la, 195; oculta, 210; del viento, 184; sobre el plano inclinado, 198

Galeno, 51, 128
Galilei, Vincenzio, 19
Galileo, *Apostillas a Ariosto*, 17; *Carta a Christina*, 150; *Carta a Ingoli*, 184; *Cartas sobre las manchas solares*, 70-94; *Consideraciones sobre el Tasso*, 17; *Consideraciones sobre la hipótesis copernicana*, 133*n*, 175, 176*n*; *Contra el uso de la toga*, 17-18; *De Motu*, 21-23, 196, 198; *Diálogo*, 12, 14, 88*n*, 91*n*, 96, 107*n*, 138; Primera Jornada, 140-154, Segunda y Tercera Jornadas, 155-198, Cuarta Jornada, 199-216; *Discurso acerca de dos nuevas ciencias*, 12, 32*n*, 127, 129, 152, 153, 154; *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, 31, 32-46, 32*n*-33*n*, 55, 57, 63-65; *Discurso sobre las mareas*, 110, 201-206; *Discurso sobre los cometas*, 96, 97-104, 98*n*, 102*n*, 109, 109*n*, 111, 113, 122; *Dos conferencias en la Academia florentina*, 17; *El ensayador*, 46, 96, 101*n*, 107*n*, 109, 111-123, 126, 196; *Juvenilia*, 84*n*; *La Bilancetta*, 17; *Mecánica*, 27, 35; *Sidereus Nuncius*, 29, 31*n*, 88*n*, 108, 137; su estilo, 96, 130-131, 141; y Aristóteles, 21-25, 34-42, 47, 51-55, 96-99, 132-154 *passim*, 167-170, 190-193, 213, 214-215; y Arquímedes, 17-29, 36-41; y el copernicanismo, 80-81, 102, 107*n*, 108, 130, 132-216; y Kepler, 109, 137, 164, 201, 213, 216; y la música, 19-20
Garin, Eugenio, 84*n*
Gassendi, Pierre, 152*n*
Gaurico, Luca, 18*n*
generalización, 69-70, 85, 92, 207
Geymonat, L., 33*n*
Gilbert, Williams, 176, 188
Golino, Carlo L., 24*n*, 33*n*
Gonzaga, Ferdinando, 31
Grassi, Orazio, 95-131 *passim*
Grazia, Vincenzio di, 31, 41*n*, 55, 56, 64
Grillo, Angelo, 71*n*
guerra, 26
Guiducci, Mario, 96, 112, 114

Hall, A. Rupert, 165*n*
halos, 99, 110, 119
Harriot, Thomas, 70*n*
Heath, T. L., 19*n*
Heráclides de Ponto, 132, 133*n*
Herón de Alejandría, 26
Herón, rey, 17
hidrostática, 22, 23, 28, 30-66; balanza, 17, 19; paradoja, 33*n*, 41-42
Hipócrates de Cos, 98
hipótesis, atómica, 46-50; de Arquímedes, 35-36, 64; de Copérnico, 107*n*, 108, 108*n*, 134, 138, 173-174, 194; de la luz propia de Venus, 68; de Scheiner, 73; de trabajo, 194; de Tycho, 107ss; subsidiaria, 57, 117, 143; y el movimiento de la tierra, 200-201; y el viento, 191-192; y la comprobación, 144; y la luna, 82, 145-146; y las manchas solares, 67-94; y las marcas, 199-201, 208-210; y los cometas, 97-99, 118; y los experimentos, 113-115
Hohenburg, Hans Geörg Herwart von, 201

humanismo, 51, 111, 130, 132
Huygens, Christian, 166

ímpetu, 33*n*, 34-35, 161, 182, 198, 208
inercia, 85, 142, 189; física pre inercial, 204; inercia circular, 197-198
infierno, 17, 18, 139
Infierno, de Dante, 17, 18
Ingoli, Francesco, 139, 140, 175, 184
inmutabilidad, de los cielos, 69-71, 82, 141-142, 145-146, 147
irrigación, 26

Jammer, Max, 33*n*
jesuitas, 67, 72, 82, 95, 107, 105*n*, 107*n*
Júpiter, 101; satélites de, 29, 70, 71, 72, 81, 137, 172

Kepler, Johann, 71, 105, 109, 110*n*, 137, 164, 201, 201*n*, 213, 216
Koestler, Arthur, 204*n*
Koyré, Alexandre, 15, 54*n*, 78, 170*n*, 178*n*, 189*n*, 197, 197*n*

Lagalla, Giulio Cesare, 90, 107, 107*n*, 183
lenguaje, de la geometría, 96, 113; de la naturaleza y de la ciencia, 53-57, 78, 130, 149; de las matemáticas, 178-179
lentes, 27, 28, 67, 68, 100, 101, 104
Leucipo, 128*n*
libración, de la tierra, 200
libro, de Dios, 84*n*; de la naturaleza, 18, 91, 84*n*, 111-115; de lo sobrenatural, 18
Lindberg, David, C., 188, 189, 190
lógica, 65-66, 111, 149, 209
luna, 57, 79, 83, 85, 90, 92, 93, 98, 99, 142, 143, 171; generaciones allí existentes, 144; libraciones de la, 215-216; montañas de la, 28, 82, 137; su luz secundaria, 180; su período, 156, 210-211; sus fases, 133; sustancia, 92-93; traslúcida, 71, 82; y las mareas, 200, 209, 213
luz, fuente pulsante de la, 126*n*; su naturaleza, 126, 127

Mach, Ernst, 42*n*, 204
macrocosmos, 125
Magalotti, Laurenzo, 139
magia, 210
Magini, G. A., 68, 69, 71*n*
magnetismo, 26-27, 29, 57-60, 187-188, 194, 197
Malapert, Charles, 71*n*
mareas, Cuarta Jornada del *Diálogo*, 206-213; *Discurso de 1616*, 201-206; evidencias observadas, 199, 202, 206, 207-208, 214; hipótesis acerca de las, 199-201; modelo físico de las, 202-205
Marsili, Cesare, 28*n*, 156, 205, 205*n*, 213*n*
Marte, 90, 105*n*, 133, 137, 151, 172, 177
Marzimedici, Alessandro, 58*n*
masa, 32*n*
matemáticas, carácter divino de las, 149-151, 196; el rol de las, 78-81, 111-112, 195-198; su desvalorización, 55, 178; y el lenguaje de la naturaleza, 53-57, 179; y el realismo, 169-171; y la certidumbre, 147-149; y la predicción, 134; y los átomos, 128-129, 171*n*; y los instrumentalistas, 90; y Tycho, 109; y verificación empírica, 187
materia, concepto aristotélico de la, 43, 44, 127, 194-196; su constitución atómica, 46-50, 121-129
Mazzoleni, Marcantonio, 27
Mazzoni, Jacopo, 90, 128, 134-137, 201
Medina, Pietro da, 199*n*
Melsen, Andrew van, 128
Mercurio, 57, 68, 71, 73, 80, 133, 151
Mersenne, Marin, 151, 152*n*, 188, 189*n*
método, de Arquímedes, 17, 18,

34-35, 38, 63; de Galileo, 11-15, 21, 24-25, 28-29, 37-42, 49, 50-55, 63, 78-81, 89-91, 130-131, 166-168, 184-186, 190; del paralaje, 99-100; para determinar el diámetro, el paralaje y la influencia de las estrellas, 185-187; socrático, 156-158, 178-183, 196; teleológico, 194; y los cometas, 110-121; y modelos, 147-149, 202-206
Micanzio, Fulgenzio, 215, 216*n*
microcosmos, 125
Miklich, Donald A., 21*n*
minimi, 122, 125-128
Mocenigo, Alvise, 26
modelo, comprobable, 160; copernicano, 109; cósmico, 90; de la bomba de agua, 26; de la luna, 83-84; de las mareas, 209-211; de un cometa, 121; el imán como un, 59; galileano, 145; ideal, 138; la palanca como un, 20, 57; mecánico, 204-206; real, 177; terrestre, 147; ptolemaico, 109, 145, 172, 176
Moerbeke, William of, 18*n*
Moletti, Guiseppe, 19, 25
momento, 24-25, 33, 33*n*, 34, 34*n*, 35, 40
Monte, Card. Francesco Maria del, 67*n*
Monte, Guidobaldo del, 19, 20, 25
Moody, E., 33*n*
Morandi, Orazio, 84*n*, 88*n*
movimiento, común, 163; de la tierra, 132-216; de las mareas, 199-216; de los cometas, 97, 101-104, 108-109; de proyectiles, 148, 158, 159-160, 181-182, 196; indiferente, 85, 198; natural, 24, 85, 147, 151, 164, 165, 168, 197, 198; rectilíneo y circular, 141-143, 151, 153, 159-160, 178, 198; violento, 165, 168, 184, 198; y calor, 116-118, 125; y sensación, 125-126
música, 19-20

Newton, Isaac, 153, 166, 197
Nicetas, 133*n*
Nifo, Agostino, 127
nominalismo, 47, 94, 196-197
Nori, Francesco, 31
novae, 81, 143, 172
Nozzolini, Tolomeo, 58-62
nubes, esencia de las, 92; su ausencia en la luna, 147; y cometas, 99, 110, 120; y manchas solares, 67-70, 71, 73, 91

observación, datos contradictorios de la, 103, 120; de la cal viva en agua, 125; de las manchas solares, 69, 70, 73, 78; de las propiedades de los *minima*, 127-128; de los cometas, 95, 102; del período de las mareas, 199, 207-208; de Tycho, 134; su importancia, 81-84; telescópica, 100-101; y Galileo, 204, 205, 208-209; y las matemáticas, 78-81, 175; y la teoría, 138-140, 177, 187-188, 207
Ockham, William de, 104
operacionalismo, *ver* realismo.
óptica, 100-101, 110
Oresme, Nicolas, 198
Origano, Davide, 213*n*
Orsini, Card. Alessandro, 202
Osiander, Andreas, 176

Padua, 22, 25, 26, 28, 29, 128; averroístas de, 127-128; lógicos de, 111; médicos de, 128*n*
palanca, 24, 26, 27, 29, 33, 34, 35, 42, 57, 162
Panofsky, Erwin, 164*n*
Papazzone, Flaminio, 31
paradigma, 147
paralaje, de la luna, 139, 140; de las estrellas, 133, 186, 207; de las manchas solares, 68, 69; de Venus, 73
parhelios, 99, 110, 119
Pascal, Blaise, 43*n*
Passignani, Domenico, 70*n*
Patrizzi, Francesco, 200*n*

Peiresc, Niccolo Fabbri de, 26*n*, 152*n*
péndulo, 20, 158, 168, 184; como modelo de las mareas, 210-211, 215
peripatéticos, filosofía de los, 48, 51, 52, 64, 140-141, 158; filósofos, 31-32, 64, 144, 170, 178-179, 194
peso, 20-26, 32-37, 32*n*, 47, 115-116, 122-123, 143, 158, 162; y la caída de los cuerpos, 21, 164, 166, 167-169, 185, 190-193, 195-197
peso específico, 20, 21, 32*n*, 33, 36, 47, 190
Pisa, 17, 20, 25, 27, 128, 134, 191, 202
Pitágoras, 54, 128*n*, 132*n*, 148, 156; la ciencia de, 153; los pitagóricos, 130, 147, 148
Planck, Max, 121
Platón, 51, 53, 71, 128*n*, 133*n*, 134, 148, 151, 152, 153, 169, 193; cosmología de, 152; y Aristóteles, 193; y el atomismo, 128*n*; y Galileo, 53*n*, 177-183; y las formas ideales, 198
poesía, 133
precesión, de los equinoccios, 200
predicción, rol de la, 47, 64, 175-176, 193-194
Pretorius, Johann, 71*n*
Proclo, 128*n*
Ptolomeo, 22, 27, 71, 105, 107, 133*n*, 163; sistema de, 109, 132, 136, 137, 138, 140, 145, 155, 156, 172-176
pulsílogo, 20

quintaesencia, 93, 125, 142

Ramponi, Giovanni Ludovico, 108, 130, 108*n*
Randall, John Hermann Jr., 111*n*
realismo, 82-94
reflexión, de la luz, 99, 180; terrestre, 71, 85
refracción, 99, 100, 101, 102, 104, 109, 110, 119, 130
Remo, Giovanni, 105*n*
Renacimiento, 50, 128, 199-201, 215
Ricci, Ostilio, 17
Riccioli, G. B., 212
Rinuccini, G. B., 95, 212*n*
Rocco, Antonio, 168, 170, 185, 190, 192, 193, 213
Roffeni, G. A., 213*n*
Roma, 107, 139, 140, 202; amigos de, 105*n*; Colegio Romano, 95, 107, 137
Rossi, Paolo, 199*n*

Sacrobosco (John Holywood), 27
Sagredo, Giovanfrancesco, 26, 90*n*, 140-213 *passim*.
Salviati, Filippo, 30, 31, 140-213 *passim*, 205*n*
Sapienza, 90
Sarpi, Paolo, 26, 27, 201
Sarsi, *ver* Grassi, Orazio.
Saturno, 70, 89, 134, 187, 193
Scheiner, Christopher, 67-91 *passim*, 70*n*
Schmitt, Charles, 18, 21*n*, 64*n*
Seleuco, 133*n*, 213*n*
Séneca, 50*n*
sensación, 125, 127, 179
sentidos, 18, 63, 90*n*, 177, 185; puerta de la filosofía, 171, 195-196, 202; y Copérnico, 171*n*, 177; y Galileo, 213
Settle, Thomas B., 15
Sfondrato, Pandolfo, 200, 209
simplicidad (y sencillez), 14, 89, 102, 104, 130, 144, 155-156, 163-164, 164*n*, 172-174, 176, 177-178, 184, 210, 216
Simplicio, 140-209 *passim*.
Sizzi, Francesco, 88*n*
Sócrates, 180, 181, 183, 184
sol, como reserva de luz, 126; detenido por Josué, 139; inclinación de su eje, 87; manchas, 67-94; rotación del, 68, 70, 77, 88; su atracción, 154, 212; su brillo, 87; su naturaleza, 78*n*; su tamaño relativo, 68; y cometas, 99, 101, 106*n*, 107*n*, 108*n*, 110; y mareas, 200; y vientos alisios, 209

sonido, 114-115
Stevin, Simon, 43*n*, 71*n*
Strauss, Emil, 152
Subow, W., 128*n*
Suidas, 117

Tarde, Giovanni, 71*n*
Tartaglia, Niccolo, 17, 18*n*
Tasso, Torquato, 164
tecnología, 18, 26, 56, 66
teleología, 187-188, 193-195
telescopio, 28, 177, 179; observaciones con el, 81*n*, 100-101, 137, 145
Telesio, Bernardo, 200
teología, 127, 193
termómetro, 27, 28, 29, 205
toletes, 26, 29
Torre Inclinada de Pisa, 20, 21*n*
trayectoria parabólica de los proyectiles, 160
Troianus, Curtius, 18*n*

vacío, 64*n*, 191-192
Valerio, Luca, 86, 87, 202*n*
Valori, Baccio, 26*n*, 51*n*
vela, 116-121
velocidades virtuales, principio de las, 24, 27, 41, 42, 57, 65
Venus, 68, 69, 71, 83, 84, 90, 151, 172, 177; fases de, 70, 73, 81, 133, 137, 172, 177
verificación, problema de la, 72-78
Vía Láctea, 28, 137
vientos alisios, 110, 208
Vinta, Belisario, 30
Vitruvio, 19*n*
Viviani, Vincenzio, 20

Watkins, J. W. N., 179
Welser, Mark, 67, 68, 69, 70, 71, 72
Westfall, Richard, S., 24*n*, 33*n*
White, Richard, 202

Zabarella, Jacopo, 127, 128
Ziegler, Reinhard, 71*n*
Zorzi, Benedetto, 51*n*

Impreso en el mes de noviembre de 1983
en Romanyà/Valls, Verdaguer, 1
Capellades (Barcelona)